

Dreidimensionale Simulation von Strömung und Sedimenttransport am Niederrhein mit Bmor3D

Three-dimensional Modeling of flow and sediment
transport at the lower Rhine using Bmor3D

Bachelorarbeit
Johanna Wartusch
Umweltingenieurwissenschaften



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Johanna Wartusch

Studiengang: Umweltingenieurwissenschaften
Sommersemester 2019

Bachelorarbeit

Thema: Dreidimensionale Simulation von Strömung und Sedimenttransport am Niederrhein mit
Bmor3D

Eingereicht: 13.08.2019

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann

Ansprechpartner: PD Dr.-Ing. habil. Peter Mewis

Fachgebiet Wasserbau und Hydraulik

Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

Technische Universität Darmstadt

Diese Arbeit ist geschützt durch die Lizenz CC-BY 4.0 International.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Symbolverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Grundgleichungen dreidimensionaler Strömungen	2
2.1 Kontinuitätsgleichung	2
2.2 Impulsgleichung	3
2.3 Reynolds Gleichung	4
2.4 Hydrostatische Druckverteilung	6
3 Numerische Lösungsmethoden	7
3.1 Finite-Elemente-Methode	7
3.2 Umsetzung in Bmor3D	8
4 Validierungsfall Niederrheinmäander	9
4.1 Charakteristik des Modellgebietes	9
4.2 Messdaten	11
4.2.1 Geometrie	11
4.2.2 Sohlproben und Geschiebefracht	12
4.2.3 Pegelganglinie	13
4.2.4 Wasserspiegelnivellements	14
4.2.5 ADCP-Messungen	14
4.3 Simulation mit TELEMAC-SISYPHE	16
5 Bmor3D	19
5.1 Topografie in <i>system.dat</i>	19
5.2 Randbedingungen in <i>rndwerte.dat</i>	19
5.3 Systemdatei <i>coeff.dat</i>	20
5.4 Morphodynamik in <i>morcoeff.dat</i>	21
6 Kalibrierung	23
6.1 Kalibrierung durch die BAW	23
6.2 Kalibrierung von Bmor3D	24
7 Simulationsergebnisse	27
7.1 Simulation des Hochwasserereignisses	27
7.2 Fließgeschwindigkeiten	29
7.2.1 Hauptströmung	29
7.2.2 Sekundärströmung	31
7.3 Verteilung der Sohlschubspannung	32
7.4 Sohlveränderung	34

8	Bewertung	36
9	Fazit	37
	Anhang	i
	Literaturverzeichnis	ii

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kontrollvolumen mit ein- und austretenden Masseströmen (Oertel, Böhle, & Reviol, 2015, S. 207).....	2
Abbildung 2: An der Oberfläche dy/dz wirkende Normal- und Schubspannungen (Oertel, Böhle, & Reviol, 2015, S. 211).....	3
Abbildung 3: Zeitliche Mittelung nach Reynolds (Oertel jr., Böhle, & Reviol, 2015, S. 129)	4
Abbildung 4: Finite-Elemente-Netz am Beispiel des Einstromrandes des Modellgebietes mit Zuordnungsmatrix (Netz erstellt mit SMS 13.0)	7
Abbildung 5: Lokale Koordinate (Oertel jr., Böhle, & Reviol, 2015, S. 360).....	7
Abbildung 6: Links: Luftbild des Modellgebiets mit Rhein-km (BAW, 2015, S. 4); Rechts: Luftbild des Modellgebiets (www.google.de/maps)	9
Abbildung 7: Sekundärströmung in einer Flusskurve (Blanckaert & Vriend, 2003, S. 2)	10
Abbildung 8: Sekundärströmung in Mäandern (Richards, 1982, S.190).....	10
Abbildung 9: Geländemodell (erstellt mit SMS 13.0).....	11
Abbildung 10: Kornverteilungen (farbig: gemessen, schwarz: gemittelt) (BAW, 2015, S. 14)	12
Abbildung 11: Rauheitsmodell (BAW, 2015, S. 9)	13
Abbildung 12: Sohle des Rheins bei km 749 innerhalb der Tauchglocke (links: Außenkurve, rechts: Innenkurve) (BAW, 2015, S. 2).....	13
Abbildung 13: Abflussganglinie Pegel Düsseldorf 01.01.2010-31.12.2011 (erstellt mit Excel 2016). 14	
Abbildung 14: Geschwindigkeiten der ADCP-Messungen bei Rhein-km 740,7 (Niesler, 2010, S. 15)	15
Abbildung 15: Geschwindigkeiten der ADCP-Messungen bei Rhein-km 740,7, Sekundärströmung (Niesler, 2010, S. 16)	16
Abbildung 17: Vergleich der Haupt- und Sekundärströmungen von Naturmessungen und 3D-Simulation an Rhein-km 740+700 (BAW, 2015, S. 39)	17
Abbildung 18: Vergleich der Sohlagenänderung in Natur und 2D-Simulation über 2 Jahre (BAW, 2015, S. 43, 44)	18
Abbildung 19: Vergleich der Sohlveränderung im 2D- und 3D-Modell (BAW, 2015, S. 51, 52)	18
Abbildung 20: Abflussganglinie Pegel Düsseldorf 06.01.2011-19.01.2011 (erstellt mit Excel 2016). 19	
Abbildung 21: Übersicht der Pegel im Ober- und Unterstrom von Düsseldorf (www.google.de/maps)	20
Abbildung 22: Wasserspiegellagen bei variiertem ks-Wert und $Q=4270 \text{ m}^3/\text{s}$ (Sohldaten 2010) (BAW, 2015, S. 31).....	23
Abbildung 23: Wasserspiegellagen in Bmor3D bei $Q=4265 \text{ m}^3/\text{s}$ (erstellt mit SMS 13.0).....	25
Abbildung 24: Vergleich Wasserspiegelfixierungen mit verschiedenen Rauheitsbeiwerten (erstellt mit Excel 2016)	26
Abbildung 25: Vergleich Wasserspiegellagen Zustromrand von Bmor3D mit Ausstromrand Randbedingung (erstellt mit Excel 2016)	27
Abbildung 26: Geschwindigkeitsverteilung am 11.01.2011 09:30 Uhr bei $Q=7932 \text{ m}^3/\text{s}$ während des ersten Hochwasserscheitels.....	28
Abbildung 27: Vergleich der Wasserspiegellagen in der Innen- und Außenkurve des zweiten Mäanders	29
Abbildung 28: Geschwindigkeitsisotachen an Rhein-km 740,7. Oben: Simulation durch Bmor3D, Unten: ADCP-Messungen (Niesler, 2010, S. 15)	30
Abbildung 29: Stromliniendarstellung über Modellgebiet bei $Q=3000 \text{ m}^3/\text{s}$	31
Abbildung 30: Schnitt A: Vertikal und Horizontalgeschwindigkeiten bei $Q=3000 \text{ m}^3/\text{s}$	31
Abbildung 31: Sohlschubspannungen bei stationärem Abfluss $Q=3000 \text{ m}^3/\text{s}$. Oben: Bmor3D, Unten: Telemac-3D (BAW, 2015, S. 49)	33
Abbildung 32: Sohlagenänderung nach 100 Tagen bei stationärem Abfluss $Q=4720 \text{ m}^3/\text{s}$. Oben: Bmor3D, Unten: Telemac-3D (BAW, 2015, S. 52).....	35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verwendete Geometriedaten (BAW, 2015, S. 8).....	11
Tabelle 2: Benötigte Systemdateien zum Start einer Simulation mit Bmor3D (Lohrey, 2017, S.50)..<	19
Tabelle 3: Korngrößenverteilung nach Fraktionen (BAW, 2015, S. 26)	21
Tabelle 4: Umrechnung des Rauheitsbeiwertes des Flussschlauches	24
Tabelle 5: Umgerechnete Reibungsbeiwerte für Kalibrierung.....	25

Symbolverzeichnis

ρ	[kg/m ³]	Dichte
t	[s]	Zeit
u	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeitskomponente in x-Richtung
v	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeitskomponente in y-Richtung
w	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeitskomponente in z-Richtung
\vec{v}	[m/s, m/s, m/s]	Geschwindigkeitsvektor [u, v, w]
τ	[N/m ²]	Schubspannung
σ	[N/m ²]	Normalspannung
p	[N/m ²]	(Flüssigkeits-)Druck
k	[N]	Kraft
g	[m/s ²]	Ortsfaktor
μ	[Ns/m ²]	Dynamische Viskosität
ν	[m ² /s]	Kinematische Viskosität
f_c	[1/s]	Koeffizient der Corioliskraft
ω	[-]	Winkelgeschwindigkeit
φ	[-]	Geographische Breite
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	[m/s]	Zeitlich gemittelte Strömungsgeschwindigkeitskomponenten
u', v', w'	[m/s]	Zeitlicher Schwankungsanteil von $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$
\bar{p}	[N/m ²]	Zeitlich gemittelter Druck
p'	[N/m ²]	Zeitlicher Schwankungsanteil von \bar{p}
μ_t	[Ns/m ²]	Scheinbare dynamische Viskosität
ν_t	[m ² /s]	Turbulente Scheinviskosität
l	[m]	Mischungsweg
κ	[-]	Karman-Konstante
v_{crit}^*	[m/s]	Kritische Schubspannungsgeschwindigkeit
Fr_{crit}^*	[-]	Kritische Feststoff-Froudezahl
ρ'	[-]	Relative Feststoffdichte
d_{ch}	[m]	Charakteristischer Korndurchmesser
D^*	[-]	Sedimentologischer Korndurchmesser
ω_s	[m/s]	Sinkgeschwindigkeit
M, N, n	[-]	Formkoeffizient für natürliche Sedimente mit Corey-Formfaktor
h	[m]	Wassertiefe
k_s	[m]	Äquivalente Sandrauheit
k_{st}	[m ^{1/3} /s]	Manning-Strickler Reibungsbeiwert
λ	[-]	Darcy-Weisbach Reibungsbeiwert
r_f	[-]	Newton-Taylor Reibungsbeiwert
I_{Quer}	[-]	Querneigungsgefälle
U	[m/s]	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit in Gerinnelängsrichtung
r	[m]	Krümmungsradius der Flusskurve
I_s	[-]	Sohlgefälle

1 Einleitung

In den letzten Jahrhunderten hat mit der Zunahme der menschlichen Eingriffe in die Umwelt auch die anthropogene Einflussnahme auf Fließgewässer zugenommen. Die Ansiedlung in unmittelbarer Nähe von Flüssen und seitliche Bebauung sowie die Schiffbarmachung sind nur wenige Beispiele, die weitreichende Auswirkungen auf die Gewässerdynamik haben. Die Rheinbegradigung im 19. Jahrhundert durch Tulla, die unter anderem dem Zweck diente, die Anlieger am Oberrhein vor Hochwasser zu schützen sowie die Strecke Basel-Worms für die Binnenschifffahrt besser nutzen zu können, ist hierfür ein typisches Beispiel: Der vorher weitläufig mäandrierende Rhein mit vielen verflochtenen Nebenarmen und stark bewachsenen Auen wurde um eine Fließstrecke von 81 km verkürzt. Zudem baute man Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts eine Reihe von Leitbauwerken, Buhnen und Uferbefestigungen zur Gewährleistung einer ausreichenden Tiefe der Schifffahrtsrinne. Allerdings führten diese Maßnahmen zu einer beträchtlichen Sohlenerosion, hervorgerufen durch die beschleunigte Fließgeschwindigkeit aufgrund der kürzeren Fließstrecke, die ihr Maximum bei einer Sohllagenänderung um 7 m erreichte. ("Der Rhein unter der Einwirkung des Menschen : Ausbau, Schifffahrt, Wasserwirtschaft," 1994) Verstärkend hinzu kamen 10 Staustufen auf der Strecke zwischen dem Bodensee und Iffezheim, die man später zum Zweck der Energiegewinnung baute, welche allerdings den Geschiebetransport vollständig unterbrechen und zu einer Sedimentablagerung in Oberstrom und einer noch massiveren Sohlenerosion im Unterstrom der Bauwerke führten. Diese am drastischen Beispiel Oberrhein beschriebene Erosion der Gewässersohle hat zur Folge, dass mit der Sohle auch der Flusswasserspiegel absinkt. Da aber die Ufer und Häfen entlang des Rheins befestigt sind, sinken dort die Wassertiefen, was diese im Ernstfall für die Schifffahrt unbrauchbar macht. ("Numerische Simulationen im Wasserbau," 1997). Um dem entgegen zu wirken, wird an den erodierten Bereichen gezielt Geschiebe zugegeben ("Der Rhein unter der Einwirkung des Menschen : Ausbau, Schifffahrt, Wasserwirtschaft," 1994). Das nötig gewordene Geschiebemanagement ist für die Binnenschifffahrt heute also von großer Bedeutung und damit im Sinne der Planung und Optimierung dieser Maßnahmen auch die Vorhersage der morphodynamischen Veränderungen der Flusssohle. Dafür ist es notwendig sowohl Fließgeschwindigkeiten, als auch Sohlenschubspannungen und daraus resultierende Sohllagenänderungen eines Gewässers mithilfe von Labormodellen bzw. heute vor allem durch numerische Modelle abbilden zu können. (BAW, 2015)

Das Ziel dieser Arbeit ist es, mit dem dreidimensionalen Strömungsmodell Bmor3D die Geschwindigkeitsverteilung für die Rheinmäander bei Neuss-Düsseldorf zu berechnen mithilfe der durch die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) erhobenen Daten des Validierungsfalls Niederrheinmäander. Diese Berechnungen werden anschließend vor allem unter dem Aspekt der entstehenden Sohlschubspannungen mit den durch die BAW bereitgestellten Messungen und Simulationsergebnissen von Telemac-Sisyphe verglichen. Anschließend soll die Sohllagenänderung mit Bmor3D berechnet und ebenfalls mit den Ergebnissen der BAW verglichen werden.

Hierzu werden zuerst die Grundgleichungen sowie die numerische Herangehensweise erläutert, auf denen die Simulationen basieren. Anschließend wird die Charakteristik des Modellgebietes bei Düsseldorf sowie die durchgeführten Messungen und Simulationen betrachtet. Darauf folgen die Vorstellung des Strömungsmodells Bmor3D sowie dessen Kalibrierung und Berechnungen mit anschließendem Vergleich und Auswertung der gewonnenen Ergebnisse.

2 Grundgleichungen dreidimensionaler Strömungen

Im Folgenden werden die Grundgleichungen, welche allen Bereichen der Strömungsmechanik (somit auch der Hydrodynamik) zugrunde liegen, aufgezeigt. In ihnen wird der Erhalt von Masse, Impuls und Energie formuliert. Sie stellen demnach Bilanzgleichungen dieser Größen innerhalb eines ortsfesten, infinitesimal kleinen Kontrollvolumens mit den Kantenlängen dx , dy und dz dar, wie es in Abbildung 1 zu sehen ist. (Oertel, Böhle, & Reviol, 2015)

2.1 Kontinuitätsgleichung

Die Kontinuitätsgleichung enthält den Erhaltungssatz der Masse. Sie besagt, dass die zeitliche Änderung der Masse innerhalb des in Abbildung 1 aufgeführten Kontrollvolumens

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \cdot dz$$

gleichzusetzen ist mit allen eintretenden Masseströmen abzüglich aller austretender Masseströme.

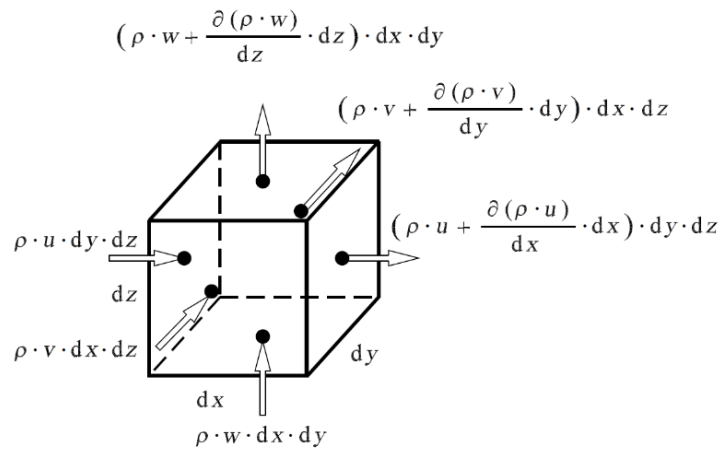


Abbildung 1: Kontrollvolumen mit ein- und austretenden Masseströmen
(Oertel, Böhle, & Reviol, 2015, S. 207)

Diese Bilanzierung ist in Abbildung 1 dargestellt, wobei u , v und w die Strömungsgeschwindigkeitskomponenten in x -, y - und z -Richtung sind. Dabei setzen sich die austretenden Masseströme aus dem eintretenden Strom

$$\rho \cdot u \cdot dy \cdot dz,$$

sowie dem sich über die Fließstrecke dx veränderlichen Anteil

$$\left(\frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} \cdot dx \right) \cdot dy \cdot dz$$

zusammen (hier beispielhaft aufgeführt anhand des Massestroms in x -Richtung). Zusammengetragen und vereinfacht ergibt dies die Kontinuitätsgleichung für kompressible Fluide:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z}.$$

Zusätzlich gilt die Inkompressibilität des Wassers, wodurch sich die Formel weiter vereinfacht:

$$0 = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \nabla \vec{v}.$$

(Oertel et al., 2015)

2.2 Impulsgleichung

Analog zur Erhaltung der Masse wird in der Navier-Stokes Gleichung der Erhalt des Impulses festgehalten. Auch hier ist die zeitliche Änderung des Impulses im Kontrollvolumen

$$\frac{\partial(\rho \cdot \vec{v})}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \cdot dz$$

zu bilanzieren mit Impulszustrom abzüglich Impulsausstrom. Zusätzlich dazu müssen hier allerdings noch Scher- und Normalspannungen an allen Oberflächen sowie weitere auf das Kontrollvolumen einwirkende Kräfte berücksichtigt werden. Diese Bilanzierung ist im Folgenden exemplarisch für die x-Richtung erläutert.

Die Zu- sowie Ausströme ergeben sich analog zu den Masseströmen, wonach sich der Ausstrom jeweils zusammensetzt aus dem Zustrom und einem über die Fließstrecke veränderlichen Anteil. Des Weiteren ist zu beachten, dass ein in x-Richtung wirkender Impuls ebenso an den anderen Oberflächen eintreten kann nur mit den entsprechend anderen Geschwindigkeitskomponenten.

$$(\rho \cdot u \cdot u + \rho \cdot u \cdot v + \rho \cdot u \cdot w) \cdot dy \cdot dz$$

bilden somit die in x-Richtung eintretenden Impulsströme.

Zudem geht der am Kontrollvolumen wirkende Spannungstensor in die Bilanzierung ein, was in Abbildung 2 exemplarisch für die $dy \cdot dz$ Oberfläche dargestellt ist. Hierbei gibt der erste Index der

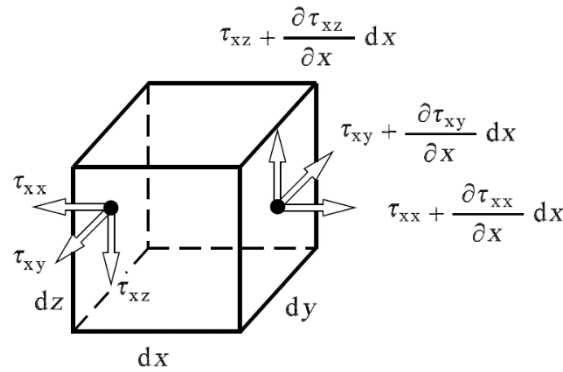


Abbildung 2: An der Oberfläche $dy \cdot dz$ wirkende Normal- und Schubspannungen (Oertel, Böhle, & Reviol, 2015, S. 211)

Schubspannung τ die Normalenrichtung der Oberfläche an, an der die Spannung wirkt, und der zweite Index die jeweilige Wirkungsrichtung. Ergänzend hierzu wird nun noch ein Zusammenhang hergestellt zwischen Flüssigkeitsdruck p und Normalspannung σ_{xx} (Herwig & Schmandt, 2018):

$$\sigma_{xx} = \tau_{xx} - p.$$

Der Normalspannungsanteil verursacht durch Reibung ist hier bezeichnet als τ_{xx} .

Erweiternd dazu kann ein Zusammenhang zwischen den Fließgeschwindigkeiten und den Spannungen hergestellt werden, welcher im symmetrischen Stokesschen Reibungsansatz formuliert ist (Oertel et al., 2015):

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) = \rho \cdot \nu \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right).$$

Weitere auf das Kontrollvolumen wirkende Kräfte werden Komponentenweise mit k_x, k_y, k_z angegeben, wobei hier in z-Richtung vor allem die Schwerkraft zu beachten ist (z ist nach oben positiv definiert) (Mewis, 2012):

$$k_z = -\rho \cdot g.$$

In x- und y-Richtung muss die Corioliskraft berücksichtigt werden, welche durch die Rotation der Erde verursacht wird: (Mewis, 2012)

$$k_x = \rho \cdot f_c \cdot v, \quad k_y = -\rho \cdot f_c \cdot u.$$

Der Koeffizient f_c wird abhängig von der Winkelgeschwindigkeit ω und der geographischen Breite φ berechnet (Wurpts, 2006):

$$f_c = 2 \cdot \omega \cdot \sin \varphi.$$

Zusammengetragen und vereinfacht sowie unter Berücksichtigung der Divergenz der Geschwindigkeiten, die für inkompressible Stoffe gleich Null ist (s. Kontinuitätsgleichung), lautet die Impulsgleichung in x-Richtung nach Navier-Stokes:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho \cdot f_c \cdot v - \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \cdot \rho \cdot \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right).$$

In y- und z- Richtung können diese Gleichungen analog aufgestellt werden:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\rho \cdot f_c \cdot u - \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \cdot \rho \cdot \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\rho \cdot g - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \nu \cdot \rho \cdot \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right). \end{aligned}$$

(Oertel et al., 2015)

2.3 Reynolds Gleichung

Um mit der Navier-Stokes sowie der Kontinuitätsgleichung nun auch turbulente Strömungen, welche in realen Fließgewässern vorliegen, und nicht nur laminare Strömungen darstellen zu können, ist es notwendig diese als Mittelwerte in einem bestimmten Zeitintervall betrachten zu können. Grund dafür sind die starken zeitlichen Schwankungen, denen die Geschwindigkeiten einer turbulenten Strömung unterliegen (Herwig & Schmandt, 2018). Somit werden die benötigten Größen wie in Abbildung 3 zeitlich gemittelt:

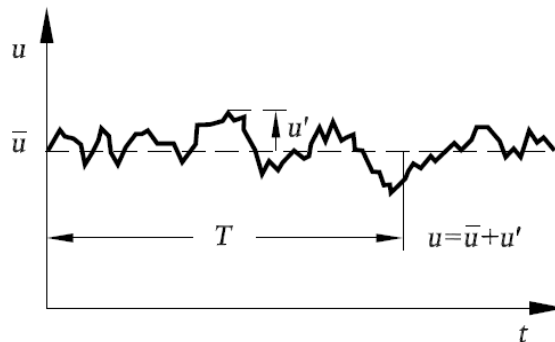


Abbildung 3: Zeitliche Mittelung nach Reynolds (Oertel jr., Böhle, & Reviol, 2015, S. 129)

$$u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v', \quad w = \bar{w} + w', \quad p = \bar{p} + p'.$$

Dabei sind $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ zeitliche Mittel der Geschwindigkeitskomponenten und u', v', w' deren Schwankungen. Die Mittelung des Drucks entsteht analog. Damit ergibt sich die zeitlich gemittelte Kontinuitätsgleichung für inkompressible Strömungen (Oertel et al., 2015):

$$0 = \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z}.$$

Ebenso entstehen die zeitlich gemittelten Navier-Stokes Gleichungen. Zudem wird eine mittlere konstante Dichte nach der Vereinfachung von Boussinesq angenommen (Wurpts, 2006):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} &= f_c \cdot \bar{v} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial (\overline{u' \cdot v'})}{\partial y} + \frac{\partial (\overline{u' \cdot w'})}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} &= -f_c \cdot \bar{u} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial (\overline{v' \cdot u'})}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial (\overline{v' \cdot w'})}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} &= -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial (\overline{w' \cdot u'})}{\partial x} + \frac{\partial (\overline{w' \cdot v'})}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \right). \end{aligned}$$

Nun wird die Vereinfachung des Spannungstensors nach Boussinesq angewandt, welcher die sogenannten Scheinschubspannungen enthält. Im folgenden Auszug des Tensors bezeichnet μ_t die scheinbare dynamische Viskosität (Wurpts, 2006):

$$\overline{u' \cdot v'} = \mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right).$$

Zudem gilt an der Sohle folgender Zusammenhang zwischen der Sohlschubspannung und den Scheinschubspannungen (Wurpts, 2006):

$$\frac{\tau_{zx}}{\rho} = \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

Hierbei ist ν_t die turbulente Scheinviskosität oder Wirbelviskosität mit den Indizes h und v, je nach horizontalem oder vertikalem Impulsaustausch. Die turbulente Scheinviskosität ist keine Stoffkonstante wie die kinematische Viskosität, sondern muss nach Prandtl's Mischungsweghypothese folgendermaßen bestimmt werden (Wurpts, 2006):

$$\nu_t = l^2 \frac{\partial u}{\partial z}.$$

Dabei wird der Mischungsweg l mithilfe der Karman-Zahl für wandnahe Strömungen $\kappa = 0,41$ (Herwig & Schmandt, 2018) berechnet. Gültig ist dies in einem Abstand zur Wand bzw. Sohle von 20 – 30% der Fließtiefe (Wurpts, 2006):

$$l = \kappa \cdot z.$$

Durch Einsetzen des Wirbelviskositätsansatzes und des Spannungstensors, sowie dem Zusammenhang $\nu_t = \mu_t / \rho$ ergeben sich die reynoldsgemittelten Navier-Stokes Gleichungen für eine turbulente inkompressible Strömung (Wurpts, 2006):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= f_c v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} v_{t,h} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} v_{t,h} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} v_{t,v} \frac{\partial u}{\partial z} \\
\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -f_c u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} v_{t,h} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} v_{t,h} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} v_{t,v} \frac{\partial v}{\partial z} \\
\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\tau_z}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} v_{t,h} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} v_{t,h} \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} v_{t,v} \frac{\partial w}{\partial z}.
\end{aligned}$$

2.4 Hydrostatische Druckverteilung

Vereinfacht man nun die Navier-Stokes Gleichung in z-Richtung so weit, dass die linke Seite, also die Advektion des Impulses, ebenso wie die Reibung und die Wirbelviskosität wegfallen, bleiben gerade die Erdbeschleunigung sowie der Druckgradient über z stehen. Diese maßgebenden Terme ergeben die bekannte Gleichung der hydrostatischen Druckverteilung:

$$p = -\rho \cdot g \cdot z$$

Diese Vereinfachungen, aus denen der dynamische Druck resultiert, rufen nur lokal zum Beispiel bei Einbauten wie Sohlschwellen geringe Abweichungen hervor. Erfahrungsgemäß trifft die Annahme jedoch weitestgehend auf reale Gewässer zu. (Mewis, 2002)

3 Numerische Lösungsmethoden

Zur Lösung der in Abschnitt 2 vorgestellten Differenzialgleichungen wird im Folgenden ein möglicher Approximationsansatz, welcher im vorliegenden Modell Anwendung findet, vorgestellt.

3.1 Finite-Elemente-Methode

Bei der Methode der Finiten Elemente wird das Integrationsgebiet Ω der gesuchten Funktion u (in unserem Fall die Fließgeschwindigkeit) in Elemente unterteilt. Die Funktion $u(x, z)$ wird zur Vereinfachung wie im verwendeten Modell zweidimensional, also abhängig von zwei Raumkoordinaten betrachtet. Die Elemente des unstrukturierten, d. h. unregelmäßigen Netzes stellen Dreiecke dar, welche in einer Zuordnungsmatrix bestimmten Eckpunkten bzw. Knoten zugeordnet werden. In Abbildung 4 ist ein solches Dreiecksnetz exemplarisch anhand des Einstromrandes des

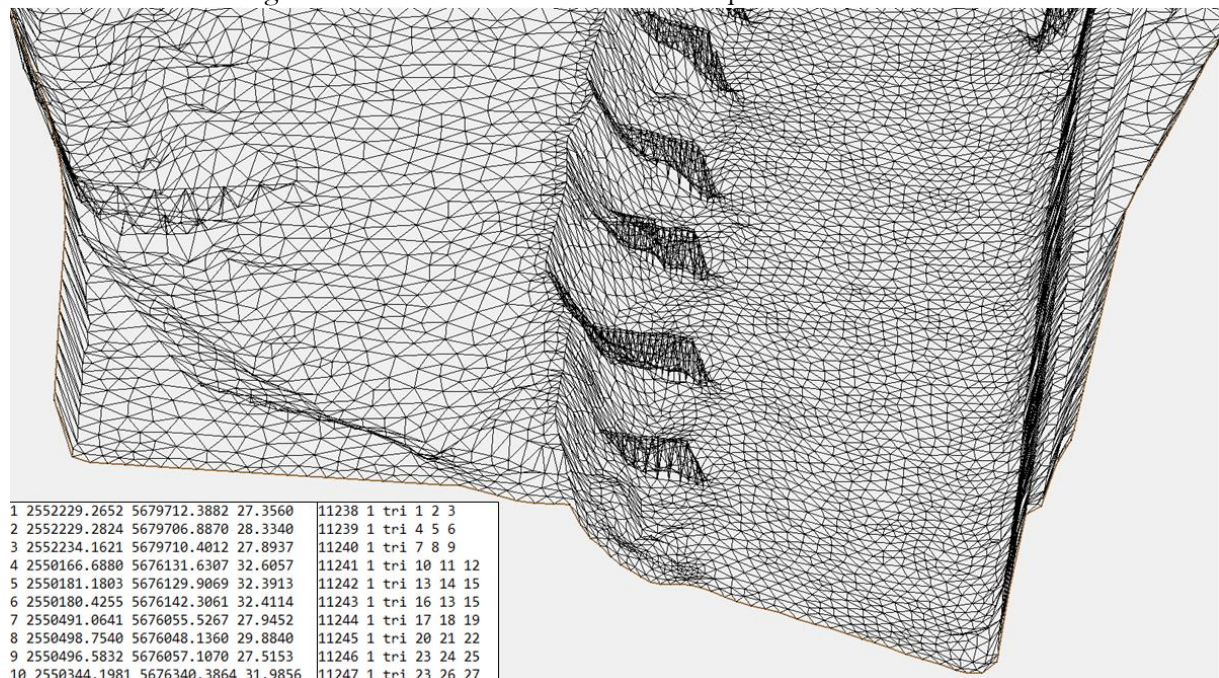


Abbildung 4: Finite-Elemente-Netz am Beispiel des Einstromrandes des Modellgebietes mit Zuordnungsmatrix (Netz erstellt mit SMS 13.0)

Testgebietes abgebildet. Links unten sind die ersten zehn durchnummerierten Knoten mit ihren Gauß-Krüger-Koordinaten zu sehen, rechts daneben ein Ausschnitt aus der Zuordnungsmatrix, welche jedem Dreieck eine Nummer sowie drei Knoten zuweist. Im weiteren Verfahren werden in jedem Element lokale Koordinaten eingeführt, hier Lagrange Flächenkoordinaten ξ , welche das

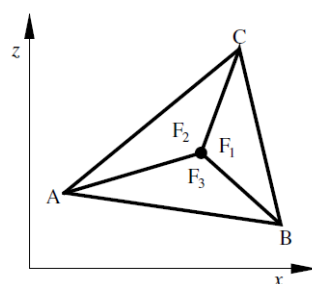


Abbildung 5: Lokale Koordinate (Oertel jr., Böhle, & Reviol, 2015, S. 360)

ursprüngliche Element in drei Teilflächen aufteilt (s. Abbildung 5). Die Koordinate ξ_j gibt den Anteil der Fläche F_j an der Gesamtfläche an und liegt somit zwischen 0 und 1. Mithilfe dieser lokalen Koordinaten (ξ_1, ξ_2, ξ_3) für jeden beliebigen Punkt in einem Dreieckselement ist das globale Integrationsgebiet unterteilt in lokale Integrationsgebiete Ω_e . Die gesuchte Funktion u wird nun je Knoten mithilfe einer endlichen Reihe approximiert, sodass die Randbedingungen erfüllt sind: (Oertel et al., 2015)

$$u_e(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = u_{e,1} \cdot N_1 + u_{e,2} \cdot N_2 + u_{e,3} \cdot N_3$$

Die Terme $u_{e,j}$ stellen hier konstante Koeffizienten dar. Die sogenannte Formfunktion N_j weist bei dem jeweiligen Knoten j den Wert 1 auf und ist bei allen anderen Knoten des Elements gleich 0. Sie wird so gewählt, dass die in der zu lösenden Differenzialgleichung vorkommende Anzahl an Ableitungen dargestellt werden können. Zur Bestimmung der gesuchten Größe u_e müssen also noch die Koeffizienten berechnet werden. Dies geschieht mittels einer formalisierten Schreibweise der Differenzialfunktion auch Differenzialoperator genannt, bei der so umgeformt wird, dass die eine Seite der Gleichung Null wird und die andere Seite eine Funktion L enthält, die von den Raumkoordinaten, sowie der gesuchten Größe und ihren Ableitungen abhängt. Da es sich bei dieser Methode allerdings um eine Annäherung handelt, ist die Funktion nicht Null sondern gleich einem Fehler R : (Oertel et al., 2015)

$$L(x, z, u, u', u'') = R \neq 0$$

Um diesen Fehler minimal zu halten, wird letztlich die Forderung gestellt, dass der über den Definitionsbereich gemittelte Fehler multipliziert mit der Normfunktion Null wird und dies in jedem der Integrationsgebiete Ω_e : (Oertel et al., 2015)

$$\sum_{e=1}^n \int_{\Omega_e} (R \cdot N_j) d\Omega_e = 0$$

Setzt man für den Fehler R den Differenzialoperator ein, ergibt sich ein lokales Gleichungssystem zur Bestimmung der fehlenden Koeffizienten $u_{e,j}$.
(Oertel et al., 2015)

3.2 Umsetzung in Bmor3D

Das hier verwendete Strömungsmodell Bmor3D nutzt die in 3.1 beschriebene Methode der Finiten Elemente. Hierzu wird der Wasserkörper in eine vorher festzulegende Anzahl an horizontale Schichten unterteilt. Des Weiteren wird automatisch eine Bodenschicht hinzugefügt, um Sohlschubspannungen und daraus resultierende Sedimenttransporte genauer berechnen zu können. Die Geschwindigkeiten sind bei Bmor3D nicht wie bei seinem Vorgängermodell Smor3D in den Knoten definiert, sondern in den Elementen. (Mewis, 2002) Neben den in Kapitel 5 weiter erläuterten Randbedingungen für Durchfluss, Wasserspiegellage und Morphodynamik sowie einem Gitternetz, benötigt das Modell zudem weitere Eingangsdaten zu Zeit (Anfangs-, Endzeit, Intervalllänge), zu den Schichten (Anzahl, Abstände) sowie zu Koeffizienten für strömungsrelevante Parameter (s. 5 Bmor3D). (Lohrey, 2017)

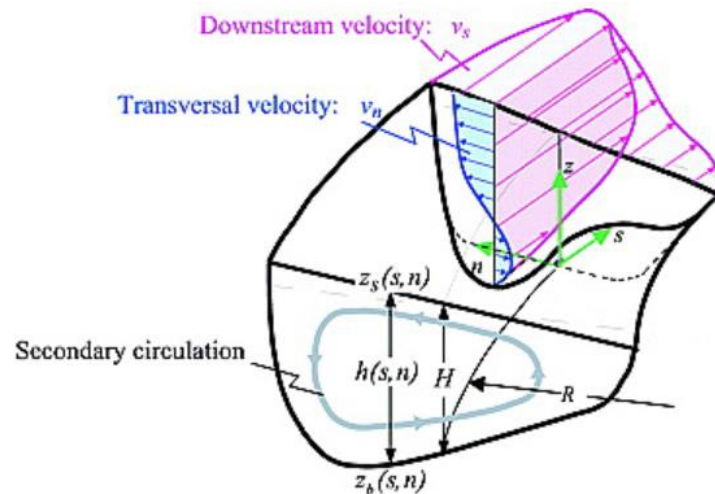


Abbildung 7: Sekundärströmung in einer Flusskurve (Blanckaert & Vriend, 2003, S. 2)

Durch (1) die nach außen wirkende Fliehkraft, (2) den Druckgradienten, hervorgerufen durch die Querneigung der Wasseroberfläche, sowie (3) unterschiedliche Geschwindigkeiten an Oberfläche und Sohle, bedingt durch die Sohlrauheit, entsteht diese spiralförmige Strömung um die Kanallängsachse (BAW, 2015). Dieser Impulstransport in Richtung der Kurvenaußenseite bewirkt außerdem, dass in Abbildung 7 abgebildete Maximum der Hauptströmung an der Außenseite. Dadurch entsteht eine Eintiefung der Sohle außen und eine Anlandung der Sohle innen, was wiederum die zuvor genannten Phänomene verstärkt. Des Weiteren ist aufgrund der in dem Testgebiet aufeinander folgenden Mäander zu beachten, dass sich die Sekundärströmung beim Kurveneingang schnell und ausgeprägt aufbaut, wohingegen im Kurvenausgang nur ein langsamer Abbau aufgrund der Trägheit der Wassermassen stattfindet. (Mewis, 2002)

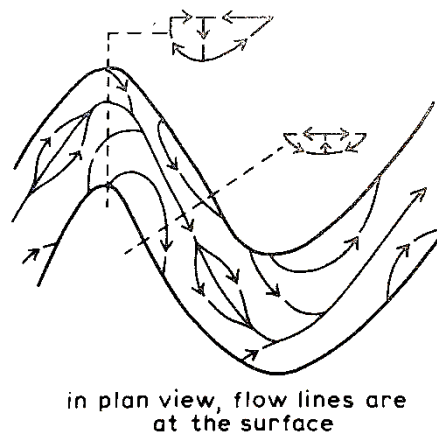


Abbildung 8: Sekundärströmung in Mäandern (Richards, 1982, S.190)

Abhängig von der Breite eines Gewässers kann es auch zu mehreren Zirkulationszellen kommen, welche asymmetrisch gegeneinander laufen. Die Konstellation dieser beiden Zirkulationen in der Kurve führt dazu, dass die äußere Zelle gegen das Ufer gedrückt wird. In den Abschnitten zwischen zwei Mäanderbögen kehrt die Richtung der gegeneinander laufenden Zirkulationszellen um (s. Abbildung 8) und die Strömung richtet sich zur Sohle, wo eine erhöhte Sohlschubspannung Erosion verursacht. (Richards, 1982) All dies führt letztlich trotz einer Vielzahl an Kolkverbauten und Buhnen im betrachteten Rheinabschnitt zu einer mittleren Tiefenerosion von 0,4 cm/a seit 2000 (BAW, 2015).

4.2 Messdaten

Der im Folgenden aufgeführte Datensatz besteht aus Unterlagen, die zu einem großen Teil schon vorhanden waren und Messungen, die vom Ingenieurbüro Schmid im Auftrag der BAW durchgeführt wurden.

4.2.1 Geometrie

Für die Geometrie des Geländes stehen verschiedene Daten aus Befliegungen, Peilungen, Querprofilen sowie Angaben zu den Bauwerken zur Verfügung, welche in Tabelle 1 zusammengefasst sind. (BAW, 2015)

Tabelle 1: Verwendete Geometriedaten (BAW, 2015, S. 8)

Flussschlauch	Messdaten Querprofilhöhen	Jahr 2000/2010
	Flächenpeilungsdaten	Jahr 2010
Vorland	Befliegungsdaten	Jahr 1998
Regelungsbauwerke, Hafeneinfahrten und Brücken	DBWK2, DGM-W _{Niederrhein}	
Buhnenbauwerke	Buhnenkataster, DBWK2, DGM-W _{Niederrhein}	

Die Buhnen haben typischerweise eine Neigung von 1:2 stromaufwärts, 1:3 stromabwärts, 1:200 am Buhnenrücken und 1:5 – 1:20 am Buhnenkopf; mit einer höheren Neigung am Prallhang als am Gleithang. (BAW, 2015) Ein Modell des Geländes ist in Abbildung 9 dargestellt.

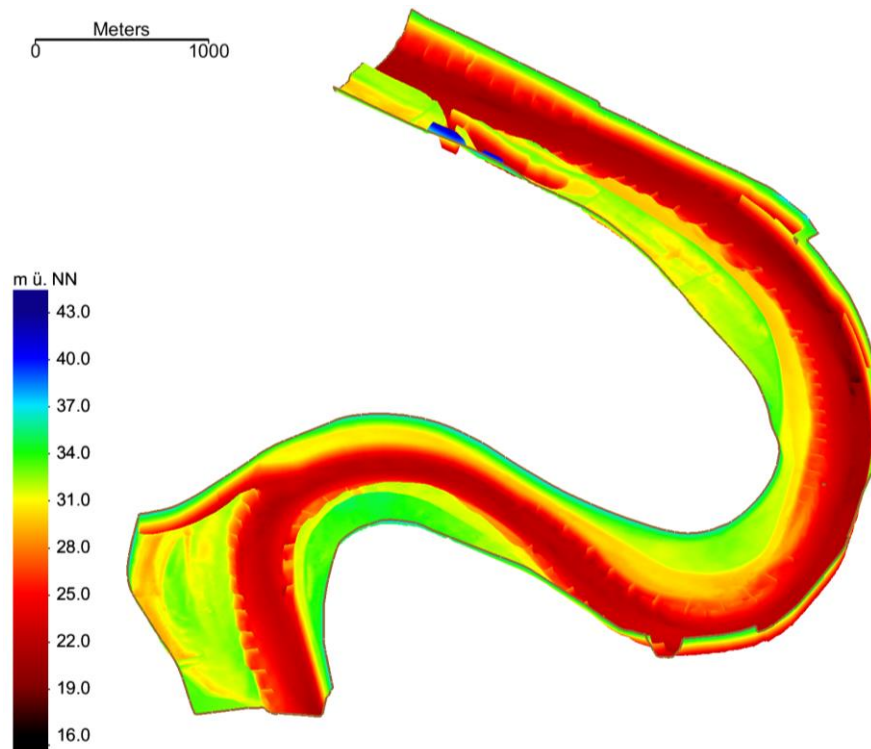


Abbildung 9: Geländemodell (erstellt mit SMS 13.0)

Die Auflösung des Rasters für Vorland und Flussschlauch beträgt 1 x 1 m. Beim Vergleich der Peilungen des Flussschlauchs von 2000 und 2010 ergab sich eine mittlere Differenz von -5,92 cm. (BAW, 2015) Zudem muss berücksichtigt werden, dass bei einer Tiefenerosion von 0,4 cm/a (s.

Charakteristik des Modellgebietes) seit der Peilung 2010 eine zusätzliche mittlere Differenz von 3,6 cm entstanden sein kann. Allerdings entstehen allein durch die recht grobe Wahl des Rasters in den interpolierten Zwischenräumen der Knoten weit größere Ungenauigkeiten.

4.2.2 Sohlproben und Geschiebefracht

Zur Erfassung von Geschiebe- und Schwebstoffmengen konnte auf die Sediment Datenbank der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) zurückgegriffen werden, welche sechsmal im Jahr Beprobungen an festen Geschiebemessstellen am Rhein durchführt und diese zur Verfügung stellt. Zudem wurden mittels einer Tauchglocke an jedem der 11 km-Profile (s. Abbildung 6) an fünf über den Querschnitt verteilten Positionen Proben genommen. So wurden an allen Punkten Gefrierkerne entnommen mit einer Länge von 1 m und einem Durchmesser von etwa 30 cm, mithilfe derer eine Aussage über die vorhandene Kornverteilung getroffen werden konnte. Diese Verteilungen sind in Abbildung 10 dargestellt, ebenso wie das letztlich verwendete Mittel (schwarze Linie), nachdem es sich bei den Bodenproben des Messgebiets überwiegend um eng gestuften Kies handelt. Um diese Verteilungen im numerischen Modell verwenden zu können, wurden zehn Korndurchmesser Fraktionen im Bereich von 0,38 mm bis 59,5 mm mit entsprechendem Volumenanteil festgelegt. Diese gemittelte Verteilung wurde über das gesamte Gebiet gleich angenommen. (BAW, 2015)

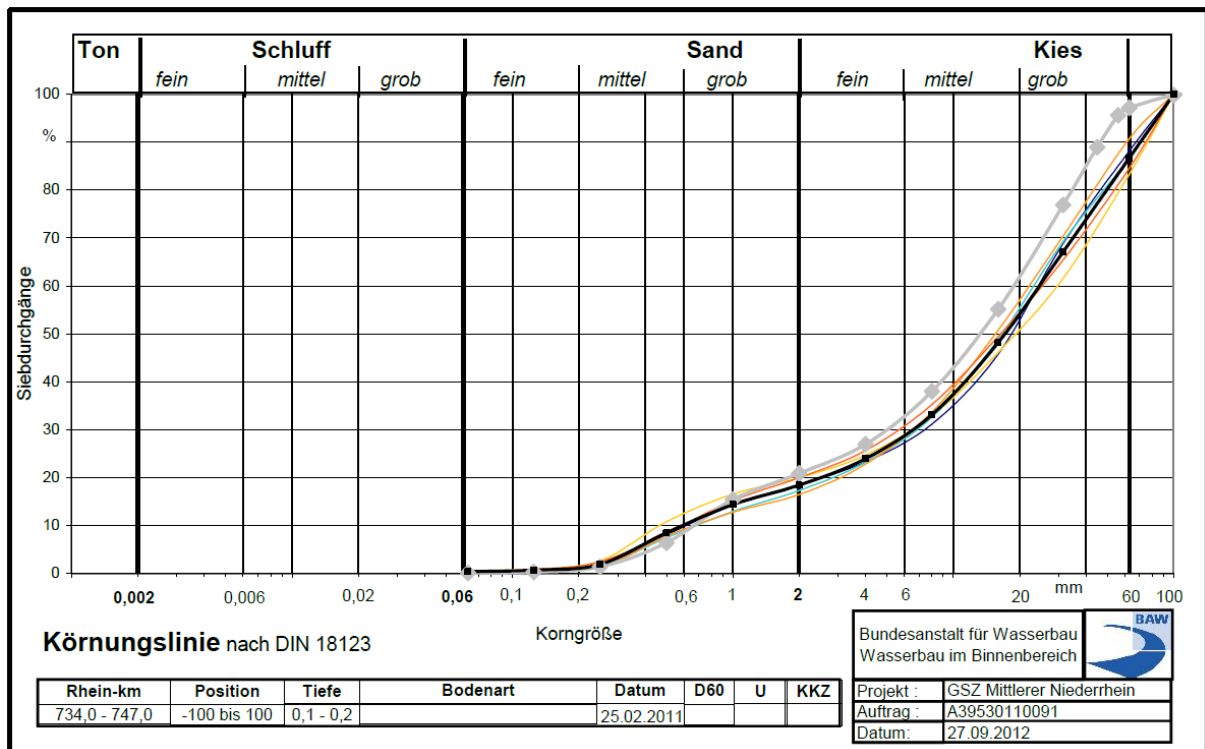
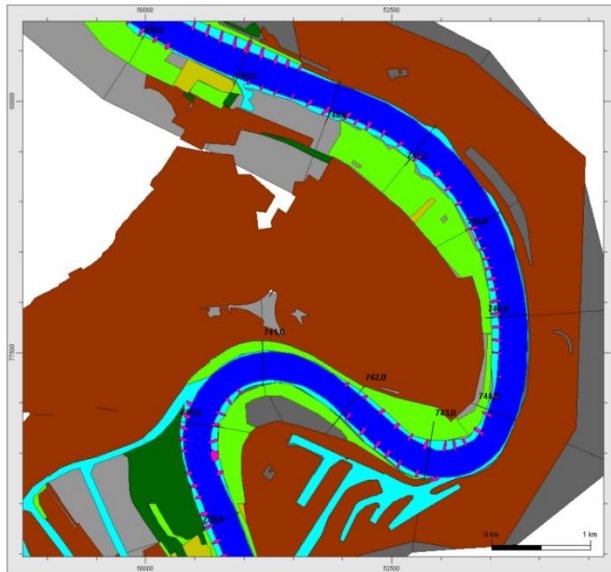


Abbildung 10: Kornverteilungen (farbig: gemessen, schwarz: gemittelt) (BAW, 2015, S. 14)

Ebenfalls anhand der gewonnenen Sohlproben sowie durch Erfassung der Oberflächenstruktur anhand von Orthofotos und Begehungen wurden für die verschiedenen Bereiche des Modellgebiets entsprechende Rauheitsbeiwerte festgelegt, wie in Abbildung 11 zu erkennen ist. Hierbei wurden auch nicht erodierbare Flächen definiert. (BAW, 2015) Nicht berücksichtigt wurden allerdings die womöglich unterschiedlichen Rauheiten im Bereich einer Kurve, hervorgerufen durch die Sekundärströmungen und die damit einhergehende Erosion feinkörniger Fraktionen außen und deren Anlandung innen (s. Charakteristik des Modellgebietes), wie es in Abbildung 12 zu sehen ist. Die Erfassung der Rauheit des Flussschlauches ist in Abschnitt 6 Kalibrierung von Bmor3D genauer erläutert.



Kategorie	k_s in m	
Flussschlauch	0,1	Blue
Buhnenfelder/Häfen	0,1	Cyan
Nicht erodierbare Sonderfläche (Buhnen)	0,3	Magenta
Grünland	0,5	Light Green
Ackerland	0,5	Yellow
Wald	0,8	Dark Green
Ortschaft	1,0	Brown

Abbildung 11: Rauheitsmodell (BAW, 2015, S. 9)



Außenufer



Innenufer

Abbildung 12: Sohle des Rheins bei km 749 innerhalb der Tauchglocke (links: Außenkurve, rechts: Innenkurve) (BAW, 2015, S. 2)

4.2.3 Pegelganglinie

Der Wasserstand am Pegel Düsseldorf bei Rhein-km 744,2 wird in einem Intervall von 15 Minuten gemessen und aufgezeichnet. Daraus ergibt sich die zur Verfügung stehende Zeitreihe der Pegelstände und Durchflüsse für den Zeitraum vom 01.01.2010 bis 31.12.2011. (BAW, 2015) Der auftretende Durchfluss bei einer bestimmten Wasserspiegellage am Pegel kann anhand der entsprechenden Schlüsselkurve zugeordnet werden. Diese gibt den funktionalen Zusammenhang zwischen Wasserstand und Abfluss wieder (h-Q-Kurve) und wird wegen ihrer Wichtigkeit für die Hochwasservorhersage und -vorsorge regelmäßig korrigiert. (Göbel & Strange, 2008) Die beiden resultierenden Ganglinien sind in Abbildung 13 dargestellt. Der mittlere Abfluss betrug in der betrachteten Zeitspanne ca. $1980 \text{ m}^3/\text{s}$, der mittlere Pegelstand $27,05 \text{ m}$ über NN. Der kleinste Durchfluss wurde am 29. November 2011 erreicht und betrug $765 \text{ m}^3/\text{s}$ mit einem Pegel von $25,05 \text{ m}$ über NN. Der maximale Wert wurde mit $7930 \text{ m}^3/\text{s}$ und $33,03 \text{ m}$ über NN am 11. Januar 2011

während eines Hochwasserereignisses erreicht. Der mittels Bmor3D simulierte Zeitraum (s. Randbedingungen in *rndwerte.dat*) ist durch die gelb umrandeten Fläche gekennzeichnet.

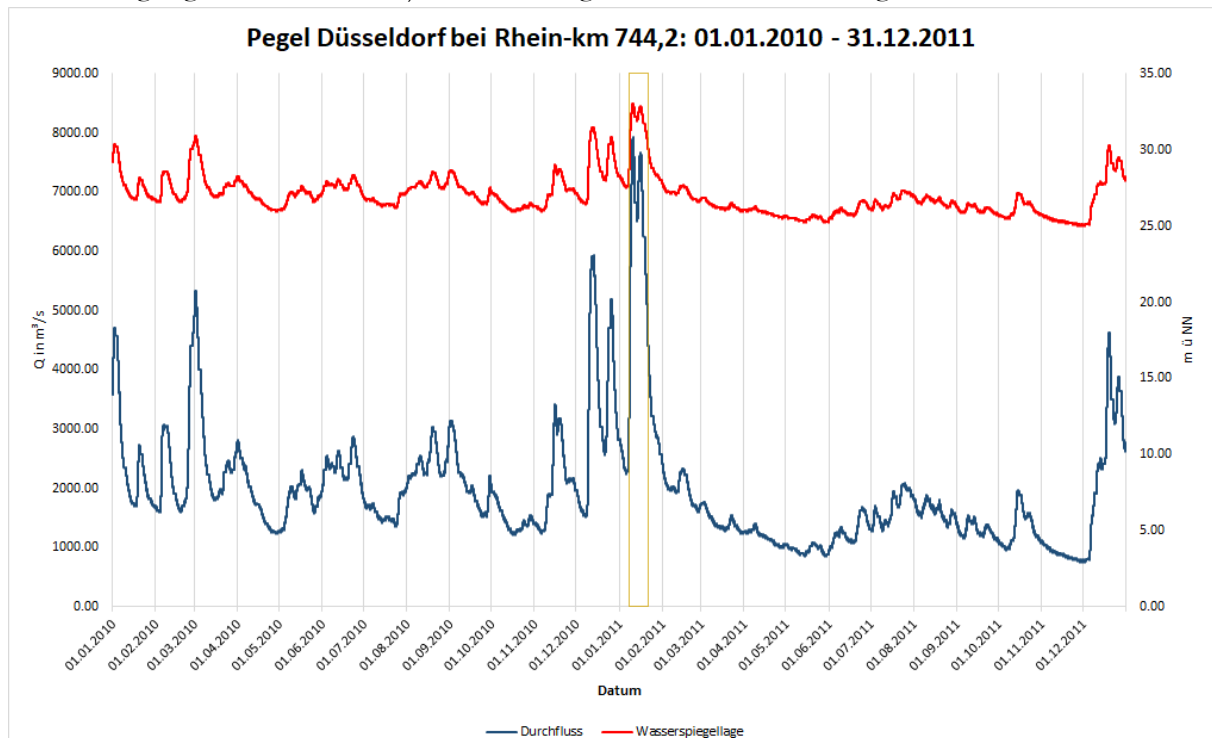


Abbildung 13: Abflussganglinie Pegel Düsseldorf 01.01.2010-31.12.2011 (erstellt mit Excel 2016)

4.2.4 Wasserspiegelnivellements

Um die Wasserspiegellagen zu erfassen, wurden in den Jahren 2002 und 2010 über DGPS mithilfe einer Referenzstation und eines Peilbootes an mehreren Querschnitten Messungen durchgeführt. Zu beiden Zeitpunkten wurde von einem etwa konstanten Abfluss ausgegangen. Die Genauigkeit dieser Wasserspiegellagen liegt bei diesem Verfahren je nach Gerät bei unter 1 bis 3 cm (Eichhorn, 2010). Zudem fanden zwecks ADCP-Messungen (s. ADCP-Messungen) weitere Wasserspiegel-nivellements statt. (BAW, 2015)

4.2.5 ADCP-Messungen

Zur Erfassung der natürlich auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten sowie ggf. der Sekundärströmung (s. Charakteristik des Modellgebietes) und dem späteren Vergleich mit Modelldaten wurden 2010 durch das Ingenieurbüro Schmid ADCP-Messungen an 8 Querschnitten des Messgebietes durchgeführt. Zudem wurde zeitgleich die Lage der Sohle sowie des Wasserspiegels mit erfasst, da dies zur Kalibrierung notwendig ist. (BAW, 2015) Das *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) Gerät nutzt hierfür den Dopplereffekt des zu ihm von sich mit Strömungsgeschwindigkeit bewegenden Planktonteilchen zurückgeworfenen Schalls einer definierten Frequenz (Mayer, Februar 2006). Dazu wird der zu vermessende Querschnitt mehrfach mit dem Messboot überfahren während das ADCP lotrechte Geschwindigkeitsprofile erstellt. Die Größe der Tiefenzellen, innerhalb derer die Geschwindigkeiten des lotrechten Profils aufgeteilt in die drei Raumkomponenten gemessen werden, ist wählbar. ("Fließgeschwindigkeits- und Durchflussmessungen," 21.05.2019) Im Falle der ADCP-Messungen im Modellgebiet am 04.03.2010 wurde eine Größe der Tiefenzellen von 20 cm gewählt und jeder Querschnitt viermal überfahren. Die Position des Bootes konnte per DGPS überprüft werden. (Niesler, 2010) Um zufällige Fehler zu vermeiden, welche bis zu 0,5 m/s betragen können,

wird zudem eine Vielzahl von Einzelmessungen aufgenommen und gemittelt. (Mayer, Februar 2006) Außerdem wurden, um grobe Fehler vorzubeugen, die Messungen bei Schiffsverkehr pausiert. Nicht auszuschließen ist hierbei allerdings eine Beeinflussung der Strömungsgeschwindigkeiten durch das Messboot selbst, welches zwar mit nur 36 cm Tiefgang und einer hohen Stabilität Turbulenzen minimiert, jedoch bei einer Länge von 9,5 m und einer Breite von 2,45 m sowie der Motorisierung als Einflussfaktor nicht unerheblich ist. Die Messungen im Modellgebiet fanden am 04. März 2010 während eines Hochwassers mit einem mittleren Durchfluss von 4277 m³/s sowie einem mittleren Pegel von 29,92 m über NN statt. In Abbildung 14 ist beispielhaft das Ergebnis der ADCP-Messungen der Quergeschwindigkeit an Rhein-km 740,7 dargestellt, welcher sich in der äußersten Neigung des ersten Mäanders befindet. Anhand der hohen Fließgeschwindigkeiten ist im Bereich ab 1,8 m/s (s. Abbildung 14 gelb bis rot) die Hauptströmung zu erkennen. Zudem sollte ermittelt werden, ob die Erfassung der Sekundärströmung ebenfalls per ADCP-Messungen möglich ist. Das Resultat davon ist in Abbildung 15 am selben Querschnitt dargestellt. Die abgebildete Strömung setzt sich zusammen aus den Geschwindigkeitskomponenten in z- und Längsrichtung. (Niesler, 2010) Eine Tendenz der Sekundärströmung konnte abgebildet werden, jedoch kann aufgrund der fehleranfälligen niedrigen Fließgeschwindigkeiten kaum von einer exakten Abbildung ausgegangen werden.

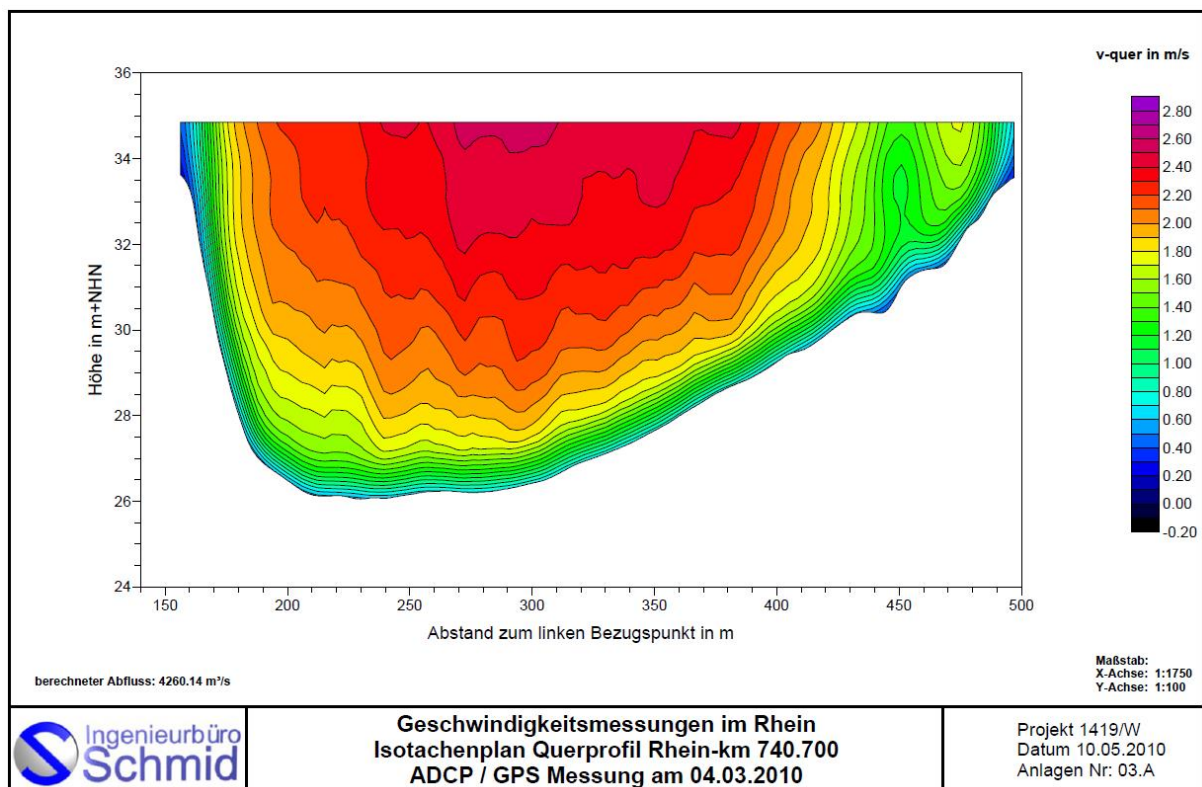


Abbildung 14: Geschwindigkeiten der ADCP-Messungen bei Rhein-km 740,7 (Niesler, 2010, S. 15)

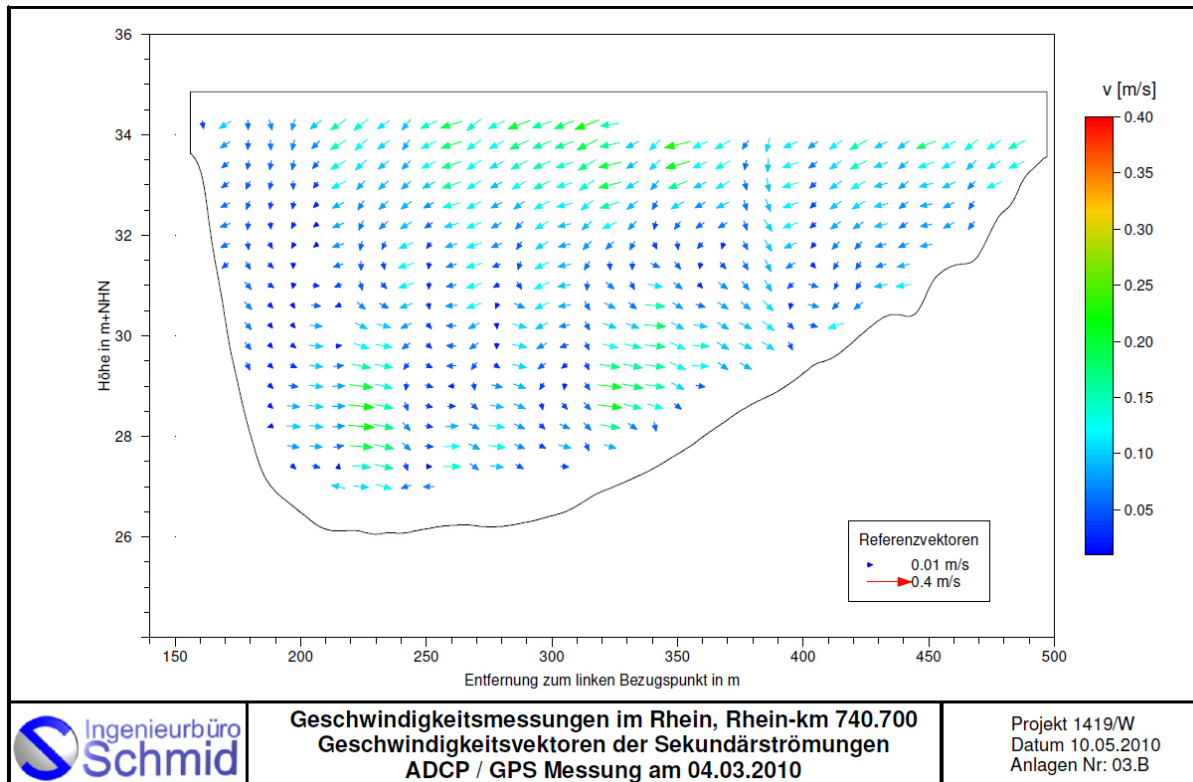


Abbildung 15: Geschwindigkeiten der ADCP-Messungen bei Rhein-km 740,7, Sekundärströmung (Niesler, 2010, S. 16)

4.3 Simulation mit TELEMAC-SISYPHE

Durch die BAW wurden 2015 bereits Validierungen mit dem Modell Telemac-Sisyphe der Electricité de France durchgeführt. Im Folgenden werden einige dieser Aspekte aufgeführt. Eine weitreichendere sowie detailliertere Darstellung der Modellvalidierung ist im Bericht der BAW zum Validierungsfall der Niederrheinmäander von 2015 aufgeführt. Mittels Telemac konnten 2D- und 3D-Modelle der Hydrodynamik erstellt werden, sowie durch eine Kopplung mit Sisyphe ein morphodynamisches Modell. Sowohl die Fließgeschwindigkeiten als auch die Wasserspiegellagen konnten verglichen mit den gemessenen Werten (s. Messdaten) bis auf geringe Abweichungen naturgetreu abgebildet werden. In Abbildung 16 ist dieser Vergleich der durch das 3D-Modell berechneten Fließgeschwindigkeiten mit denen der ADCP-Messungen von Rhein-km 740,7 gegenübergestellt. Die Farbskala gibt die Querströmung an, welche im Modell eine naturnahe Verteilung aufzeigt, jedoch in der Hauptströmung höhere Werte annimmt, als durch Messungen erfasst wurden. Des Weiteren konnten auch die Sekundärströmungen, die durch Punktmessungen erfasst wurden, mit nur geringen Differenzen durch das 3D-Modell wiedergegeben werden. Diese sind in Abbildung 16 anhand einer Vektorendarstellung visualisiert. Die Sekundärströmung konnte in Verteilung und Größenordnung reproduziert werden. (BAW, 2015)

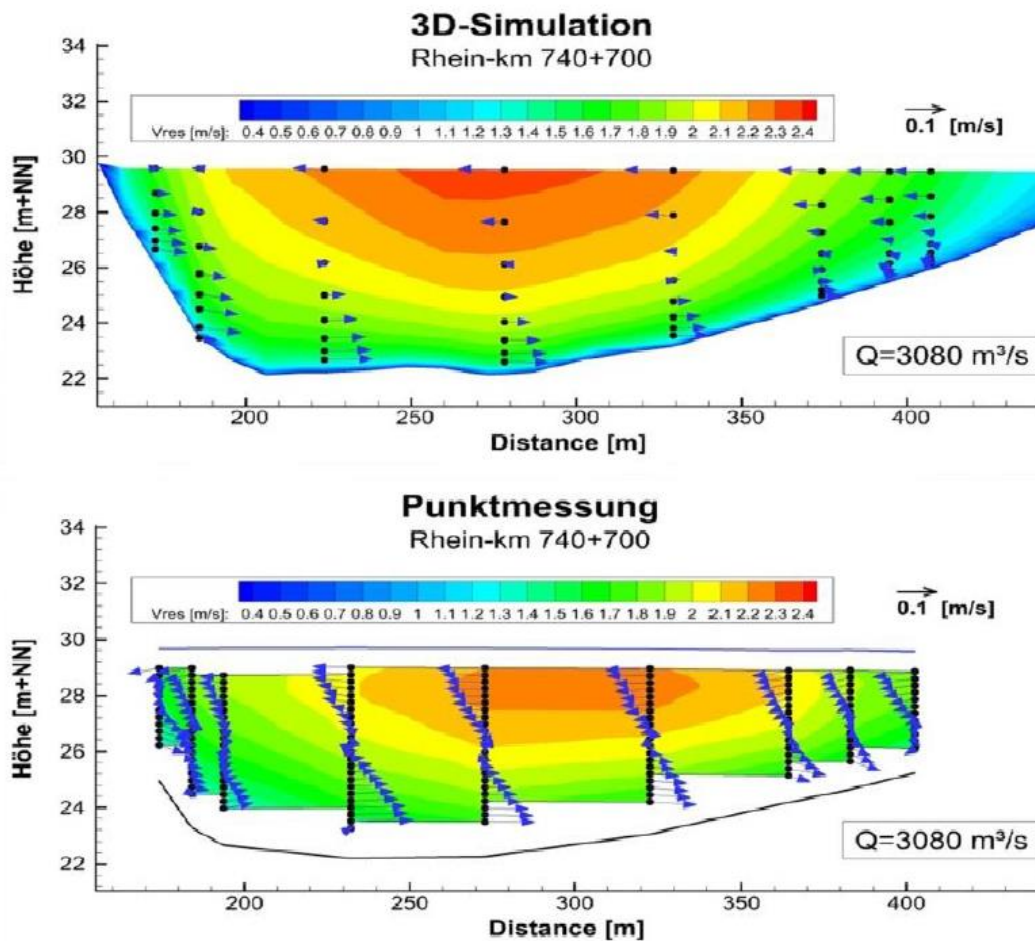


Abbildung 16: Vergleich der Haupt- und Sekundärströmungen von Naturmessungen und 3D-Simulation an Rhein-km 740+700 (BAW, 2015, S. 39)

Beim Vergleich der simulierten Morphodynamik mit der in der Natur gemessenen ergaben sich weniger klare Übereinstimmungen. So wurde die im Testgebiet langjährig gemessene und gemittelte Geschiebetransportmenge von 180.000 t/a mit einer im Modell errechneten Menge von 170.000 t im Jahr 2001 und 180.000 t im Jahr 2002 naturgemäß wiedergegeben. Die Sohllagenänderung über 2 Jahre dagegen weist lokal Differenzen auf. In Abbildung 17 ist zu erkennen, dass sich die über die 2 Jahre entwickelte Sohllagendifferenz allgemein in einer ähnlichen Größenordnung befindet. Aus der Abbildung der Naturmessung kann eine Umlagerung von etwa $\pm 0,5$ m abgelesen werden, mit Maxima am Kurvenausgang. Im 2D-Modell erfolgen vor allem in diesen Kurvenbereichen höhere Erosionen und Akkumulationen sowie lokale Maxima von ± 1 m. (BAW, 2015)

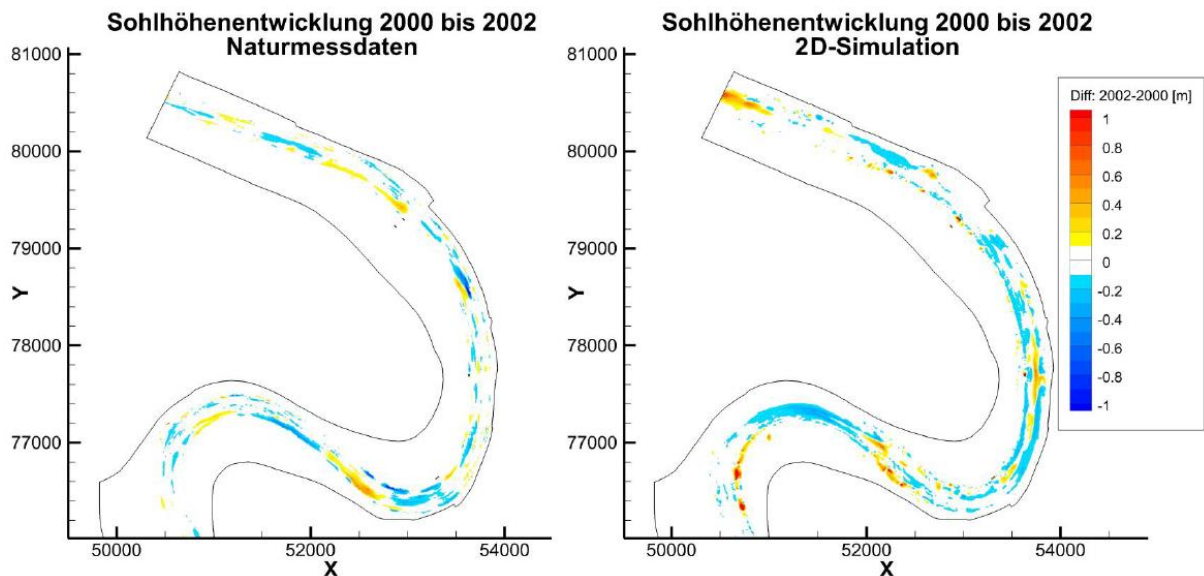


Abbildung 17: Vergleich der Sohlagenänderung in Natur und 2D-Simulation über 2 Jahre (BAW, 2015, S. 43, 44)

Da die 3D-Simulation der Sohlhöhenveränderung wegen des hohen Rechenaufwands nicht über 2 Jahren berechnet wurde, ist nur ein Vergleich bei stationären Abflussbedingungen über 100 Tage möglich. Über dieselbe Zeitspanne bei einem stationären Abfluss von $Q=3000 \text{ m}^3/\text{s}$ wurde auch die Sohlschubspannung verglichen, wobei sowohl Verteilung als auch Größenordnung der 2D- und 3D-Modelle sehr gut übereinstimmen. Dementsprechend sind auch die Sohlhöhenänderungen beider Modelle ähnlich, welche in Abbildung 18 nach 100 Tagen bei einem stationären Abfluss von $Q=4270 \text{ m}^3/\text{s}$ dargestellt sind. Die Anlandung im Kurveninnenbereich sowie Erosion außen konnte durch beide Modelle wiedergegeben werden und auch Verteilungen und Größenordnung beider Modelle stimmen überein. Allerdings ist der Bereich der Sohlveränderung im 3D-Modell breiter. Letztlich können durch 2D- und 3D-Modelle ähnliche Ergebnisse erzielt werden, jedoch ist die Größenordnung bei beiden mit $\pm 0,5 \text{ m}$ über 100 Tage im Vergleich zu den Naturmessungen deutlich zu hoch. (BAW, 2015)

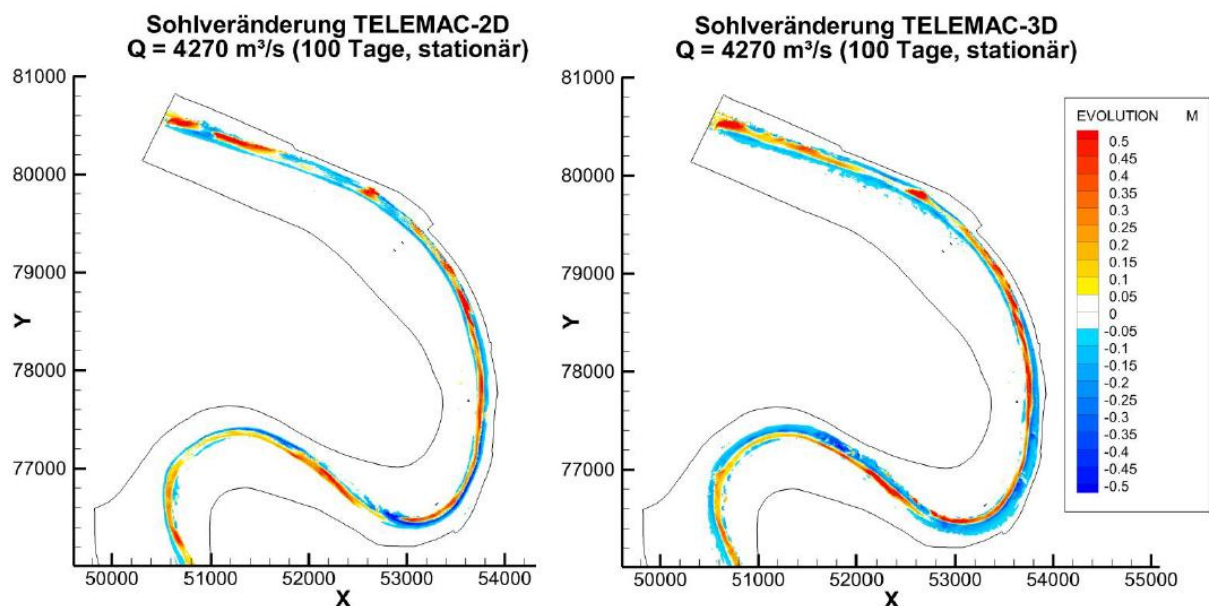


Abbildung 18: Vergleich der Sohlveränderung im 2D- und 3D-Modell (BAW, 2015, S. 51, 52)

5 Bmor3D

Das Modell Bmor3D benötigt vor Beginn der Simulation vier Systemdateien, mithilfe derer die Eingangsdaten festgelegt werden. Diese sind in Tabelle 2 aufgeführt. (Lohrey, 2017)

Tabelle 2: Benötigte Systemdateien zum Start einer Simulation mit Bmor3D (Lohrey, 2017, S.50)

Systemdatei	Inhalt
<i>coeff.dat</i>	Zeit- und Schichtoptionen Koeffizienten für strömungsrelevante Parameter
<i>system.dat</i>	Gitternetz aus Knotenpunkten in Gauß-Krüger-Koordinaten
<i>rndwerte.dat</i>	Randbedingungen: Durchfluss und Wasserspiegellagen am Modellrand
<i>morcoeff.dat</i>	Parameter für Morphodynamik und Geschiebetransport

Diese Eingangsdaten sowie die Kalibrierung des Modells werden im Folgenden erläutert.

5.1 Topografie in *system.dat*

In der Datei *system.dat* wird die Topografie des Testgeländes erfasst. Das Gitternetz bestehend aus einem Dreiecksnetz (s. Finite-Elemente-Methode) basierend auf Knotenpunkten in Gauß-Krüger-Koordinaten. Vor einer Auflistung aller Knoten und Elemente erfolgt eine Angabe zur Gesamtzahl der beiden. Ein vollständiges Modell des Geländes ist in Abbildung 9 zu sehen.

5.2 Randbedingungen in *rndwerte.dat*

Als Zeitfenster wurden zwei Wochen ab dem 06.01.2011 bis zum 19.01.2011 gewählt, da in diesem Zeitraum ein besonders starkes Hochwasser stattfand, wie aus der Zwei-Jahres-Ganglinie in

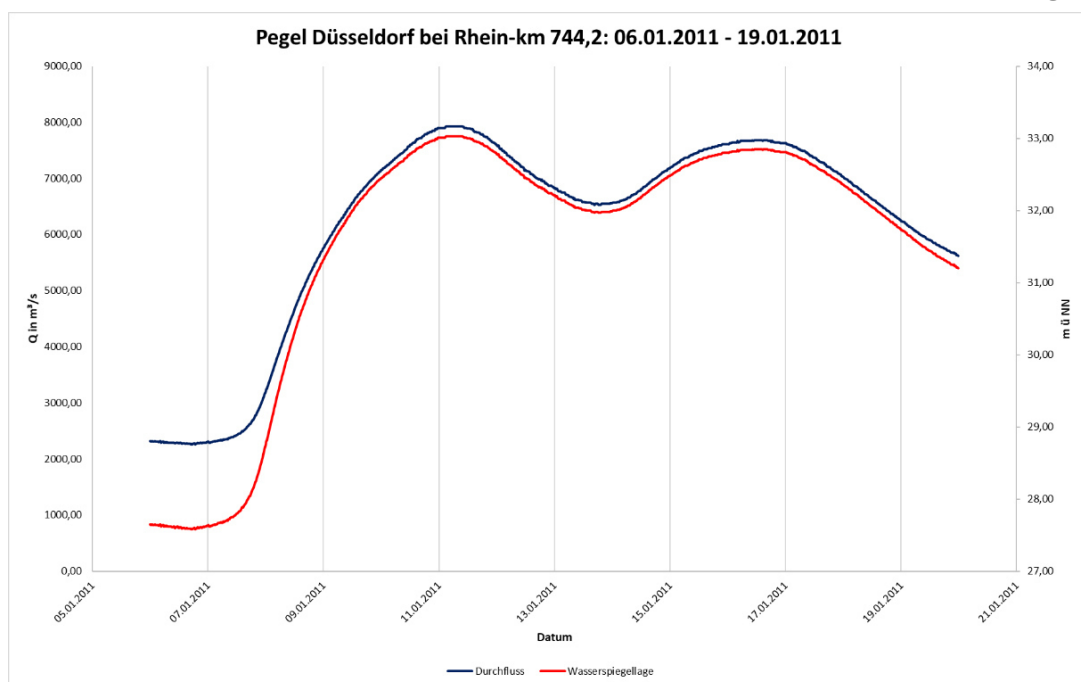


Abbildung 19: Abflussganglinie Pegel Düsseldorf 06.01.2011-19.01.2011 (erstellt mit Excel 2016)

Abbildung 13 zu entnehmen ist. Die Ganglinie für diese zwei Wochen ist in Abbildung 19 dargestellt. Das Maximum des Hochwassers wird am 11.01.2011 zwischen 03:00 und 10:00 Uhr mit einem maximalen Durchfluss von $7930 \text{ m}^3/\text{s}$ und einem maximalen Wasserstand von $33,03 \text{ m ü. NN}$ erreicht. Der zweite Scheitel des Hochwassers tritt am 17.01.2011 mit Maximalwerten von $Q=7680 \text{ m}^3/\text{s}$ und $h=32,85 \text{ m ü. NN}$ auf. Eine Simulation über einen längeren Zeitraum ist aufgrund der langen Rechendauer von etwa drei Simulationstagen pro Tag in diesem Rahmen nicht möglich. Diese Zeitreihen haben eine Intervalllänge von 15 Minuten und werden für Durchfluss am Einstromrand und Wasserspiegellage am Ausstromrand mittels der Systemdatei *rndwerte.dat* übergeben. Diese werden als Randbedingungen verwendet, was insofern kritisch zu betrachten ist, da sich der Pegel Düsseldorf, an dem diese Ganglinien gemessen wurden, an Rhein-km 744,2 befindet, etwa bei der Hälfte des betrachteten Rheinabschnittes. Bei einer Verschiebung der Wasserspiegellagen zum Ausstromrand über das mittlere Gefälle von $0,17 \text{ ‰}$ (s. Charakteristik des Modellgebietes) tritt über die Strecke bis zum Ausstromrand von $4,8 \text{ km}$ eine Differenz der Wasserspiegellagen von $81,6 \text{ cm}$ auf. Dieser Wert wird von allen Wasserständen des Pegels Düsseldorf subtrahiert. Die Durchflüsse werden mit einer konstanten zeitlichen Verschiebung von -30 Minuten zum Einstromrand verschoben (BAW, 2018). In Abbildung 20 sind die nächsten Pegel im Ober- und Unterstrom in rot markiert, deren Ganglinien ebenfalls als Randbedingung hätten verwendet werden können, welche allerdings $56,2$ bzw. $36,6$ Rhein-km entfernt sind. Diese Pegel befinden sich im Oberstrom in Köln bei Rhein-km 688 und im Unterstrom bei Duisburg bei Rhein-km 780,8. ("Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes," 07.07.2019) Somit würde auch mit einer Verschiebung der Pegelganglinien einer der beiden anderen Pegel keine Verbesserung der Genauigkeit erzielt werden. Da sonst keine weiteren kontinuierlichen Zeitreihen von zum Beispiel mobilen Pegeln über einen solchen langen Zeitraum zur Verfügung stehen, ist die angepasste Ganglinie des Pegels Düsseldorf hier die sinnvollste Wahl als Randbedingung.



Abbildung 20: Übersicht der Pegel im Ober- und Unterstrom von Düsseldorf (www.google.de/maps)

5.3 Systemdatei *coeff.dat*

In der Systemdatei *coeff.dat* werden zuerst die Zeitoptionen festgelegt. Es wird die Anfangszeit bei 0 Sekunden sowie die Endzeit ($1.208.700$ Sekunden) bei einem Tapeintervall von 900 Sekunden (15 Minuten) und Zeitschritten von $0,25$ Sekunden definiert. Die Anzahl der Schichten wird auf 12 festgelegt, worin eine $0,5$ Meter dicke Bodenschicht enthalten ist (s. Umsetzung in Bmor3D). Ebenso wird die Höhe der Schichten in Meter über NN angegeben, hier in Abständen von jeweils einem Meter von 20 bis 30 m ü. NN . Des Weiteren werden Werte für horizontalen und vertikalen Austausch, der

Coriolisbeiwert (s. Impulsgleichung), der Reibungsbeiwerte (s. Kalibrierung von Bmor3D) ebenso wie der erste Wert der Randbedingung Wasserspiegellage definiert.

5.4 Morphodynamik in *morcoeff.dat*

Die morphodynamische Simulation wird zweimal bei verschiedenen stationären Abflüssen gestartet. Bei $Q=3000 \text{ m}^3/\text{s}$ ist der Abfluss im bettbildenden Bereich; die Buhnen werden hier umströmt. Bei $Q=4270 \text{ m}^3/\text{s}$ dagegen ist der Abfluss bordvoll und die Buhnen werden überströmt, womit dies einen guten Vergleich bietet. Beide Simulationen sollen die Sohländerung nach 100 Tagen berechnen. Auf Grund der langen Rechendauer werden lediglich je zwei Tage gerechnet mit einem morphodynamischen Faktor von 50, welcher in der Systemdatei *morcoeff.dat* festzulegen ist. Zudem muss für die Simulation des Sedimenttransportes eine Kornverteilung in 10 Fraktionen definiert werden, welche durch die BAW anhand der Sieblinie vorgegeben wurde und in Tabelle 3 aufgeführt ist. Diese Verteilung wird für das gesamte Gebiet gleich angenommen. Eine solch gleichmäßige und konstante Verteilung bildet zwar nicht die natürliche Sohlbeschaffenheit ab, jedoch ist es hinsichtlich einer guten Vergleichbarkeit auf jeden Fall sinnvoll, dieselben Eingangsdaten wie auch bei Telemac-Sisyphus zu verwenden.

Tabelle 3: Korngrößenverteilung nach Fraktionen (BAW, 2015, S. 26)

Fraktion	$d_m [\text{mm}]$	Anteil [Vol.-%]
1	0,38	6,41
2	0,75	8,99
3	1,5	5,42
4	3	6,12
5	6	11,04
6	12	17,12
7	23,75	21,74
8	38,25	12,09
9	50,5	6,64
19	59,5	4,43

Zudem muss der Bereich der erodierbaren Flächen definiert werden. Da die befestigten Ufer ebenso wie die Buhnen nicht erodierbar sind, wurde für den Bereich, in dem Erosion uneingeschränkt stattfinden kann, der Teil des Flussschlauches gewählt, welcher zwischen den links- und rechtseitig befestigten Buhnen verläuft.

Des Weiteren muss eine kritische Schubspannungsgeschwindigkeit nach der folgender umgeformten Formel für die Feststoff-Froudezahl definiert werden (Patt, Jürging, Kraus, Jürging, & Kraus, 2009):

$$v_{crit}^* = \sqrt{Fr_{crit}^* \cdot \rho' \cdot g \cdot d_{ch}}$$

Dabei beträgt der charakteristische Korndurchmesser d_{ch} 20 mm. Dieser wurde anhand der Korngrößenverteilung gemittelt. Da der sedimentologische Durchmesser

$$D^* = \left(\frac{\rho' \cdot g}{v^2} \right)^{1/3} \cdot d_{ch} = 424,74,4 > 150$$

ist (Patt et al., 2009), kann die kritische Feststoff-Froudezahl für den Bewegungsbeginn nach van Rijn auf $Fr_{crit}^* = 0,055$ festgelegt werden (Fleißner & Dorfmann, 2013). Die relative Feststoffdichte

beträgt für Sand und Kies (Quarz) $\rho' = 1,65$ (Katzenbach, 2013). Damit ergibt sich für die kritische Schubspannungsgeschwindigkeit 0,13344 m/s. Der Geschiebetransport wird in Bmor3D anhand der Formel von Meyer-Peter und Müller berechnet. Dabei wird die tatsächliche Schubspannung mit der kritischen Schubspannung für den Bewegungsbeginn verglichen, welche sich anhand der kritischen Schubspannungsgeschwindigkeit berechnet. Unterhalb dieser Geschwindigkeit bzw. Schubspannung findet keine Bewegung der Sohle statt. (Patt et al., 2009)

Zudem muss eine Sinkgeschwindigkeit in *morcoeff.dat* definiert werden, welche nach folgender Formel berechnet werden kann (Fleißner & Dorfmann, 2013):

$$\omega_s = \frac{M \cdot v}{N \cdot d_{ch}} \cdot \left[\sqrt{\frac{1}{4} + \left(\frac{4 \cdot N \cdot D^{*3}}{3 \cdot M^2} \right)^{1/n}} - \frac{1}{2} \right]^n$$

Hierbei sind $M=33,9$; $N=0,98$ und $n=1,33$ Koeffizienten für natürlich geformte Sedimentteilchen (Fleißner & Dorfmann, 2013). Daraus resultierte eine Sinkgeschwindigkeit von 0,65757 m/s.

6 Kalibrierung

Durch die BAW wurde bereits eine Kalibrierung sowie eine Bestimmung des Rauheitsbeiwertes durchgeführt, welche im Folgenden erläutert und diskutiert werden. Zudem wird die Kalibrierung von Bmor3D vorgestellt.

6.1 Kalibrierung durch die BAW

Um die unbekannte Rauheit der Flusssohle zu kalibrieren, wurden durch das Ingenieurbüro Schmid im Auftrag der BAW unter Annahme von stationärem Durchfluss von $4270 \text{ m}^3/\text{s}$ am 04.03.2010 die Wasserspiegellagen im Zuge der ADCP-Messungen an acht verschiedenen Querschnitten erfasst (s. Legende Abbildung 21: WSP ADCP). Vergleichswerte entstanden zudem bei drei weiteren Messungen im Auftrag der BAW im Jahr 2002. Die Definition des konstanten Durchflusses 2010 basiert vermutlich auf der ersten Durchflussmessung am tiefsten Querschnitt bei Rhein-km 745,9, wo ein Durchfluss von $4270 \text{ m}^3/\text{s}$ erfasst wurde (Niesler, 2010). Die Durchflusserfassung am Pegel Düsseldorf ergab für den Zeitraum der Messungen (04.03.2010 8:15-14:30 Uhr) jedoch ein Mittel von $4282 \text{ m}^3/\text{s}$ mit einer Standardabweichung von 0,9 %. Mit diesem angenommen konstanten Durchfluss und variierenden Rauheitsbeiwerten wurden drei Simulationen mit Telemac-Sisyphe durch die BAW gestartet und die sich dort ergebenden Wasserspiegellagen mit den gemessenen verglichen, wie es in Abbildung 21 dargestellt ist. Darauf basierend wurde ein k_s -Wert von 0,1 m gewählt, da dieser die größte Übereinstimmung zu den Messungen liefert. Für die in Abbildung 21 dargestellte Kalibrierung wurden Sohldaten von 2010 verwendet. Dagegen lieferte eine vergleichbare Simulation

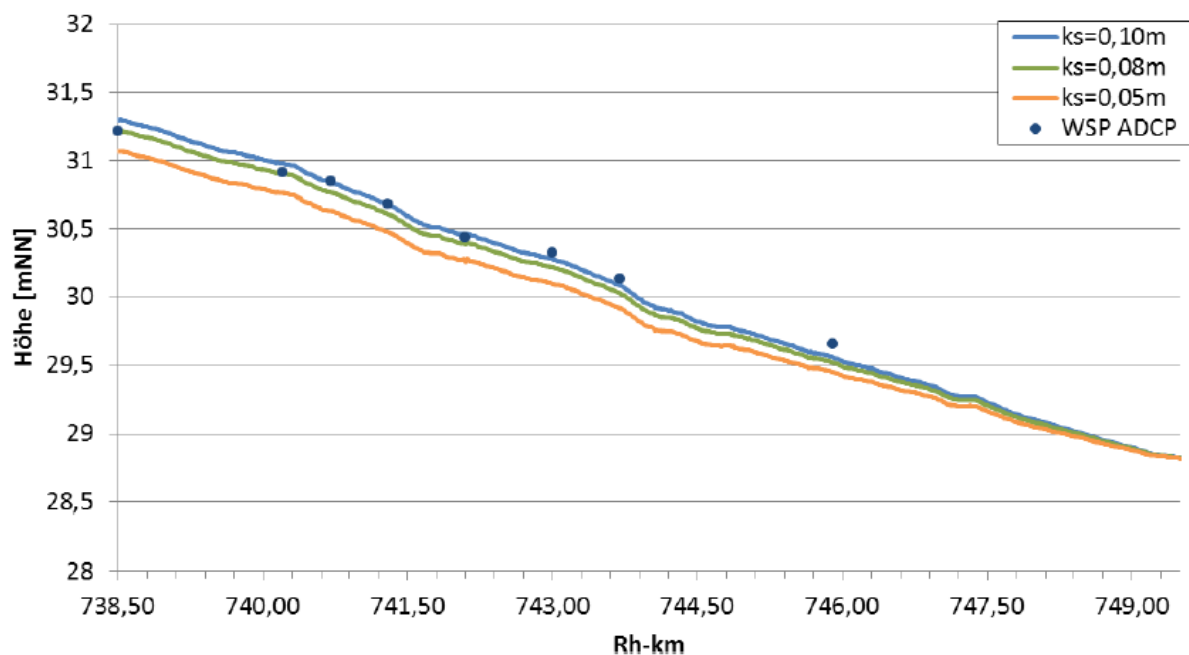


Abbildung 21: Wasserspiegellagen bei variiertem k_s -Wert und $Q=4270 \text{ m}^3/\text{s}$ (Sohldaten 2010) (BAW, 2015, S. 31)

mit einem konstanten Abfluss von $3000 \text{ m}^3/\text{s}$, welche ebenfalls auf Wasserspiegelpailungen aus dem Jahr 2010 beruhte, Ergebnisse mit nur geringen Abweichungen, allerdings unter Verwendung von Sohlpeilungen aus dem Jahr 2002. Hier hätte ein k_s -Wert von 0,08 m gewählt werden können, was einen nur minimalen Einfluss der Sohlagenänderung auf den Wasserspiegel aufzeigt. (BAW, 2015) Es ist anzunehmen, dass die Randbedingung des Wasserspiegels am Ausstromrand durch die BAW

auf ca. 28,8 m ü. NN geschätzt wurde, da keine Messung an diesem Punkt vorliegt (s. Abbildung 21). Verschiebt man die Wasserspiegelmessung an Rhein-km 745,9 von ca. 29,65 m ü. NN über das mittlere Gefälle, ergibt sich am Ausstromrand ein Wasserspiegel von 29,12 m ü. NN. Einen Vergleichswert liefert die Verschiebung über das Gefälle des Pegelstandes in Düsseldorf von 29,92 m ü. NN bei einem Durchfluss von 4720 m³/s, was einen Wasserstand von 29,10 m ü. NN am Ausstromrand ergeben würde. Beide Werte lassen vermuten, dass der Wasserstand am Ausstromrand für die Kalibrierung zu niedrig angesetzt wurde. Das ist auch an der Tendenz der letzten drei Messungen zu höheren Werten und einer Tendenz der ersten Messung zu einem niedrigeren Wert zu erkennen (s. Abbildung 21). Der k_s -Wert hätte also durchaus niedriger angesetzt werden können.

6.2 Kalibrierung von Bmor3D

Zur Verwendung der Rauheitsinformation in Bmor3D ist zuerst eine Umrechnung des k_s -Wertes nötig; diese Umrechnung ist in Tabelle 4 aufgeführt. Eingelesen wird ein Newton-Taylor-Beiwert, welcher dann unter Berücksichtigung der Sohlenschichtstärke und des Gitternetzes weiter umgerechnet wird. Die für die Umrechnung nötige Wassertiefe h kann anhand des über die Zeitreihe vom 06.01.2011 bis zum 19.01.2011 gemittelten Pegelstandes von 704 cm und des gleichwertigen Wasserstandes, der am Pegel Düsseldorf 97 cm beträgt, berechnet werden ("Der aktuelle Rheinpegel in Düsseldorf - Berechnung," 03.07.2019). Somit beträgt die gemittelte Wassertiefe der zwei zu simulierenden Wochen $h = 857$ cm. Daraus ergibt sich der verwendete Rauheitsbeiwert für den Flussschlauch von $r_f = 0,0033$ (s. Tabelle 4), welcher unter anderem in der Datei *coeff.dat* festgelegt wird. Dieser Rauheitsbeiwert repräsentiert natürlich nur den Hochwasserfall. Im Vergleich dazu beträgt die mittlere Wassertiefe über die zwei Jahre 2010 und 2011 einen Wert von 407 cm. Anhand dieser gemittelten Normalwassertiefe ergibt sich ein Newton-Taylor-Beiwert von $r_f = 0,0042$. Für das Modell gewählt wurde jedoch der Beiwert $r_f = 0,0033$, da dieser mit einer gemittelten Tiefe der zwei betrachteten Wochen den zu simulierenden Hochwasserfall besser wiedergibt.

Tabelle 4: Umrechnung des Rauheitsbeiwertes des Flussschlauches

Verwendete Wassertiefe h [cm]	Äquivalente Sandrauheit k_s [m]	Manning-Strickler-Beiwert k_{st} [m ^{1/3} /s]	Darcy-Weisbach-Beiwert λ [-]	Newton-Taylor-Beiwert r_f [-]
	gegeben (BAW, 2015)	$k_{st} = \frac{26}{\sqrt[6]{k_s}}$ (Bollrich, 2013)	$\lambda = \frac{8 \cdot g}{k_{st}^2 \cdot h^{1/3}}$ (Mewis, 2012)	$r_f = \frac{\lambda}{8}$ (Mewis, 2012)
857	0,1	38,163	0,0263	0,0033
407	0,1	38,163	0,0338	0,0042

Im Laufe der Simulation ergaben sich jedoch durch Annahme des k_s -Wertes der BAW zu hohe Wasserstände am Einlauftrand. In Abbildung 22 sind die Wasserstände bei einem Durchfluss von $Q=4265$ m³/s dargestellt, welche vergleichbar sind zu denen, die die BAW für ihre Kalibration verwendet hat. Bei einer unterstromigen Randbedingung von 29,03 m ü. NN läge der Wasserspiegel am Einlauftrand mit einer Verschiebung über das mittlere Gefälle bei 30,73 m ü. NN. Wie aus Abbildung 22 zu entnehmen ist, ergab sich im Modell dort jedoch eine Wasserspiegellage von 31,5 m ü. NN. Auch im Vergleich zur Wasserspiegelfixierung bei ca. 31,25 m ü. NN am Einstromrand durch das Ingenieurbüro Schmid ist diese simulierte Wasserspiegellage zu hoch. Daher musste der

Reibungsbeiwert wie vermutet durch eine eigene Kalibration verringert und an Bmor3D angepasst werden.

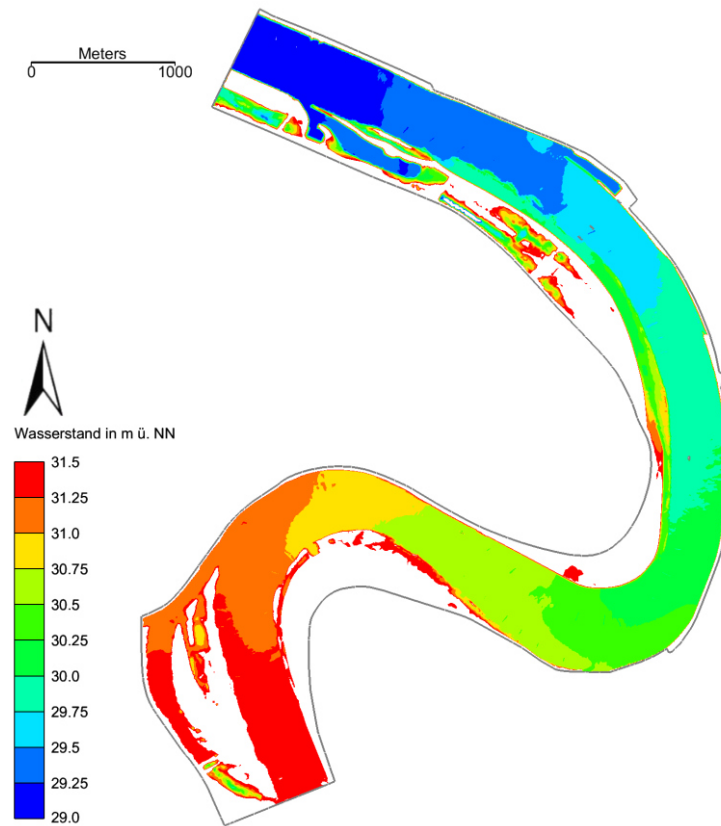


Abbildung 22: Wasserspiegellagen in Bmor3D bei $Q=4265 \text{ m}^3/\text{s}$ (erstellt mit SMS 13.0)

Die Kalibrierung des Newton-Taylor Beiwertes für Bmor3D wird im Folgenden erläutert. Verwendet wurden die durch die BAW zur Verfügung gestellten Wasserspiegelfixierungen. Gewählt wurden zwei Fixierungen bei unterschiedlichen konstanten Durchflüssen. Der Abfluss vom 14.11.2012 liegt bei $Q=2710 \text{ m}^3/\text{s}$, befindet sich im bettbildenden Bereich, umströmt die Buhnen und stellt somit Normalabflussverhältnisse dar. Die zweite gewählte Fixierung fand am 13.12.2010 mit $Q=5750 \text{ m}^3/\text{s}$ statt, womit die Werte zeitlich näher an der Sohlpeilung des Modells liegen und zudem einen Hochwasserfall simulieren. (BAW, 2018) Verglichen wurden die drei k_s -Werte 0,1 m, 0,07 m und 0,05 m (s. Tabelle 5). Die Werte wurden mittels der in Tabelle 4 aufgeführten Formel umgerechnet, wobei die benötigte Wassertiefe h wie zuvor berechnet wurde.

Tabelle 5: Umgerechnete Reibungsbeiwerte für Kalibrierung

Verwendete Fixierung	k_s -Wert [m]	k_{st} -Wert [$\text{m}^{1/3}/\text{s}$]	r_f -Wert [-]
$Q=2710 \text{ m}^3/\text{s}$ vom 14.11.2010 mit $h=518 \text{ cm}$	0,1	38,163	0,0039
	0,07	40,500	0,0035
	0,05	42,836	0,0031
$Q=5750 \text{ m}^3/\text{s}$ vom 13.12.2010 mit $h=833 \text{ cm}$	0,1	38,163	0,0033
	0,07	40,500	0,0030
	0,05	42,836	0,0026

In Abbildung 23 sind die Werte der beiden Fixierungen aufgetragen und werden jeweils mit den sich bei der Simulation ergebenden Wasserständen am Einstromrand verglichen. Bei der Kalibrierung mit

$Q=2710 \text{ m}^3/\text{s}$ ergab sich die beste Übereinstimmung bei $k_s=0,05 \text{ m}$ mit einer Differenz von $-0,04 \text{ m}$. Die Simulation bei $k_s=0,07 \text{ m}$ erbrachte eine Differenz von $+0,09 \text{ m}$. Im Vergleich dazu erbrachte das Modell bei der Kalibrierung mit $Q=5750 \text{ m}^3/\text{s}$ und $k_s=0,07 \text{ m}$ mit $-0,04 \text{ m}$ die kleinste Differenz. Der k_s -Wert von $0,1 \text{ m}$ ergab eine Abweichung am Einstromrand um $+0,06 \text{ m}$. Darauf beruhend wurde für die Simulation mit Bmor3D ein k_s -Wert von $0,07 \text{ m}$ gewählt, da dieser im Vergleich beider Abflusssimulationen die geringste Abweichung erbrachte. Zudem findet in dem für das Modell

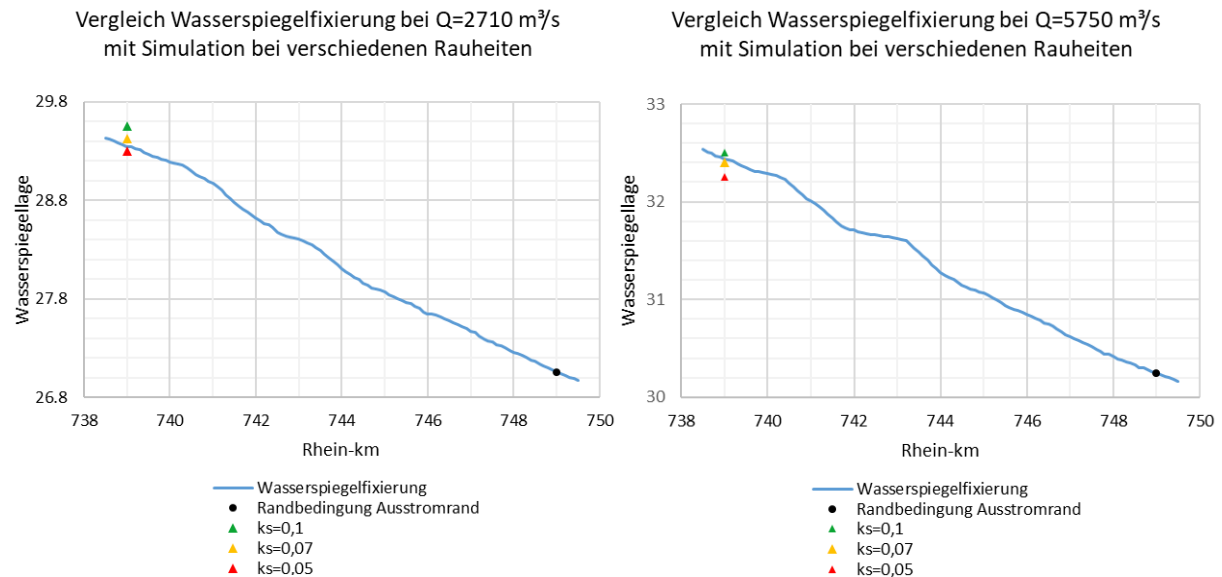


Abbildung 23: Vergleich Wasserspiegelfixierungen mit verschiedenen Rauheitsbeiwerten (erstellt mit Excel 2016)

links: Fixierung vom 14.11.2010 bei $Q=2710 \text{ m}^3/\text{s}$, rechts: Fixierung vom 13.12.2010 bei $Q=5750 \text{ m}^3/\text{s}$

gewählten Zeitraum ein Hochwasser statt, welches für $k_s=0,07 \text{ m}$ die besten Ergebnisse erzielte.

Ein Rauheitsbeiwert dieser Größenordnung kann in den sehr rauen Bereich eingeordnet werden und entspricht einer Sohle aus mittlerem Kies bis Schotter (Bollrich, 2013). Die Kornverteilung der Flusssohle ergibt einen Anteil von mittlerem Kies oder größerer Körnung von ca. 73 % (s. Abbildung 10). Demnach entspricht die Wahl des Rauheitsbeiwertes den Proben der Flusssohle. Eine weitergehende Einordnung der beweglichen Sohle hinsichtlich ihrer Formrauheit, verursacht durch Riffel und Dünen, ist anhand der vorliegenden Daten nicht möglich. Für eine solche Einschätzung ist das durch die BAW zur Verfügung gestellte, verwendete Raster mit einer Entfernung der Rasterpunkte von ca. 1 m (s. 4.2.1) zu grob (Malcherek, 2001). Zudem wurden durch die BAW keinerlei Angaben zu vorhandenen Dünen im Modellgebiet gemacht.

7 Simulationsergebnisse

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse von Bmor3D vorgestellt und mit den vorliegenden Messungen sowie der Simulation von Telemac-Sisyphe verglichen. Alle Modellabbildungen wurden mit den Programmen SMS 13.0 und ParaView 5.6.0 erstellt.

7.1 Simulation des Hochwasserereignisses

Zum Testen des instationären Verhaltens des Modells Bmor3D sollte ein Hochwasserereignis vom 06.01.2011 bis zum 11.02.2011 simuliert werden (BAW, 2018). Auf Grund der hohen Rechendauer wurde dieser Zeitraum auf den 06.01. bis zum 19.01. eingeschränkt. Über diese Dauer ergab sich die in Abbildung 24 dargestellte Ganglinie der Wasserstände am Zustromrand (blau), welche mit den vorgegebenen Wasserspiegellagen der Randbedingung am Ausstromrand (rot) verglichen werden. Es stellte sich ein mittleres Gefälle von 2,70 ‰ mit einem Maximum von 2,79 ‰ und einem Minimum von 2,60 ‰ ein. Höhere Werte wurden bei dem starken Anstieg von Durchfluss und Pegelstand am 08. und 09.01. vor dem ersten Peak des Hochwassers erreicht. Niedrigere Werte ergaben sich vor allem durch die im Diagramm sichtbaren Schwankungen des Wasserspiegels, die während der beiden Hochwasserwellen stärker ausgeprägt sind. Die Schwankungen betragen bis zu $\pm 5,5$ cm. Der durch Bmor3D errechnete Wert des Gefälles liegt im Mittel 1 ‰ über dem tatsächlichen mittleren Gefälle des Modellgebiets. Letztlich liefert das Modell jedoch trotz hoher Durchflüsse sowie Pegelstände und einer Überflutung der Vorländer (s. Abbildung 25) gute Ergebnisse; die Ganglinien verlaufen mit weitestgehend konstantem Gefälle parallel.

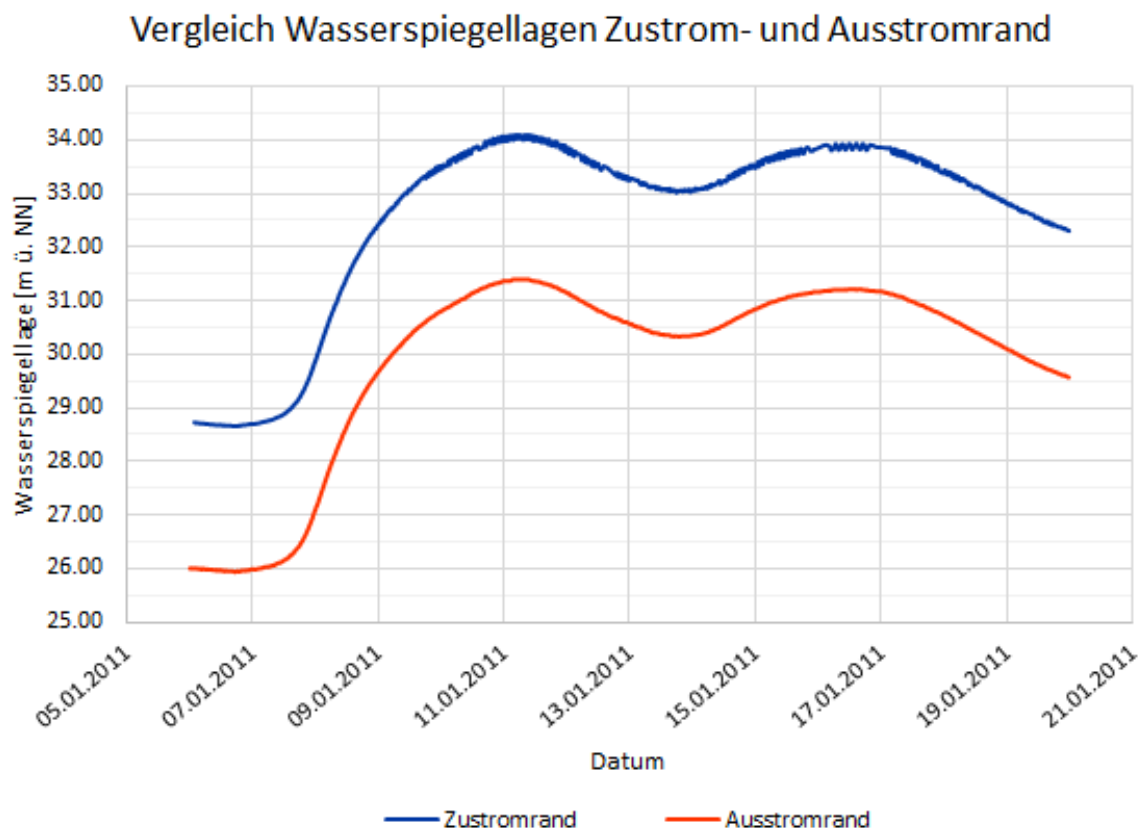


Abbildung 24: Vergleich Wasserspiegellagen Zustromrand von Bmor3D mit Ausstromrand Randbedingung (erstellt mit Excel 2016)

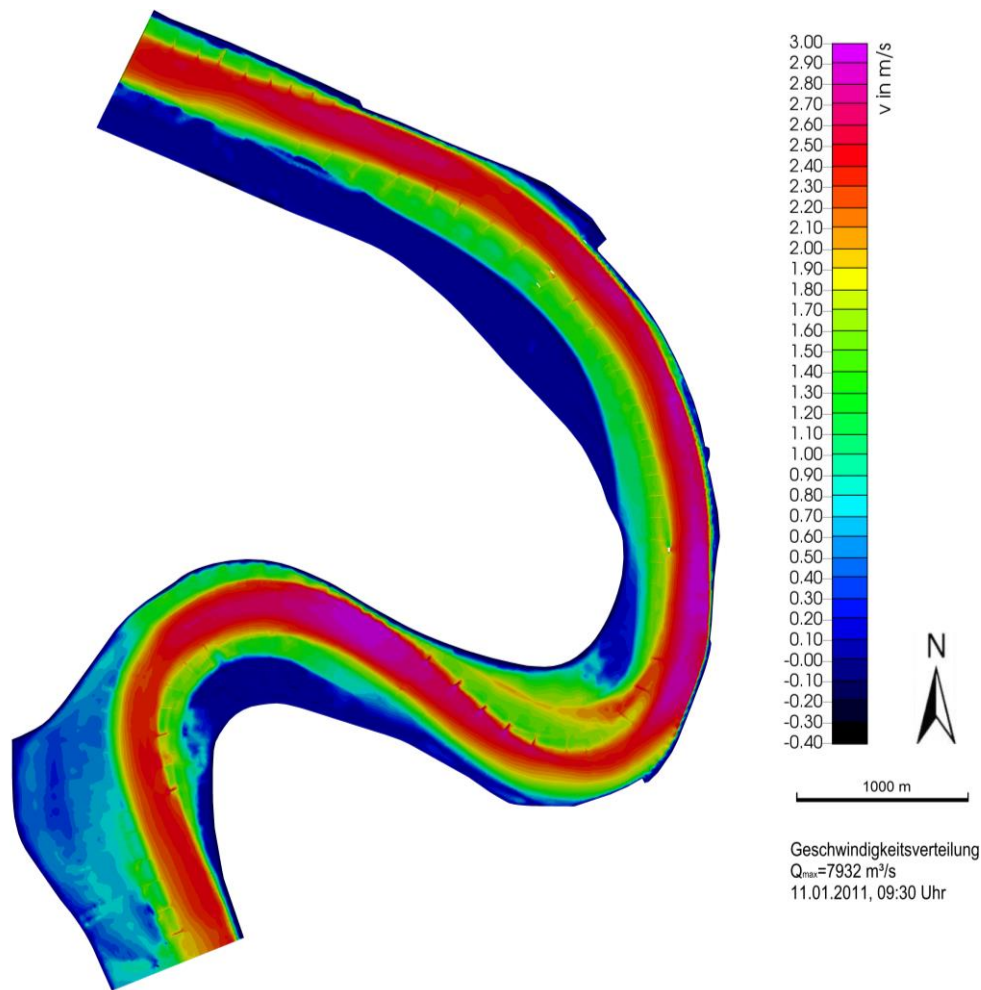


Abbildung 25: Geschwindigkeitsverteilung am 11.01.2011 09:30 Uhr bei $Q=7932 \text{ m}^3/\text{s}$ während des ersten Hochwasserscheitels

In dieser Hochwassersimulation werden Fließgeschwindigkeiten bis zu 3 m/s erreicht. Die Maxima sind in der Geschwindigkeitsverteilung des Hochwasserpeaks in Abbildung 25 an der Außenkurve hinter den Scheiteln der Mäander zu verzeichnen. Das weitläufigere Vorland hinter dem Einstromrand wird mit niedrigeren Fließgeschwindigkeiten überströmt. In den Mäandern und in einem weiten Teil vor dem Ausstromrand werden die Retentionsflächen mit weit höheren Geschwindigkeiten von bis $1,5 \text{ m/s}$ überströmt, was 50% der Hauptströmungsgeschwindigkeit entspricht. Zudem konnte in den Kurven ein Quergefälle der Wasserspiegellagen mit einer mittleren Differenz von 19 cm simuliert werden. Der Ort der verglichenen Punkte innerhalb des zweiten Mäanders sowie die Ganglinien sind in Abbildung 26 dargestellt. Vor Einsetzen des Hochwassers betrug die Differenz weit niedrigere Werte von ca. 14 cm , welche insbesondere während der Hochwasserscheitel auf bis zu 22 cm anstieg. Das entspricht im Mittel einem Gefälle von $0,74 \text{ ‰}$ bei einer Entfernung der beiden Punkte von $260,26 \text{ m}$. Berechnet man das Quergefälle über die Formel (Mewis, 2002):

$$I_{\text{Quer}} = \frac{U^2}{g \cdot r}$$

mit einem angenommenen Kurvenradius von $1200 - 1400 \text{ m}$ und einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von $2,5 - 3 \text{ m/s}$, erhält man ein Gefälle von $0,45 - 0,76 \text{ ‰}$. Die simulierte Querneigung liegt in diesem berechneten Bereich und stellt somit in Anbetracht der hohen Durchflüsse ein zufriedenstellendes Ergebnis dar.

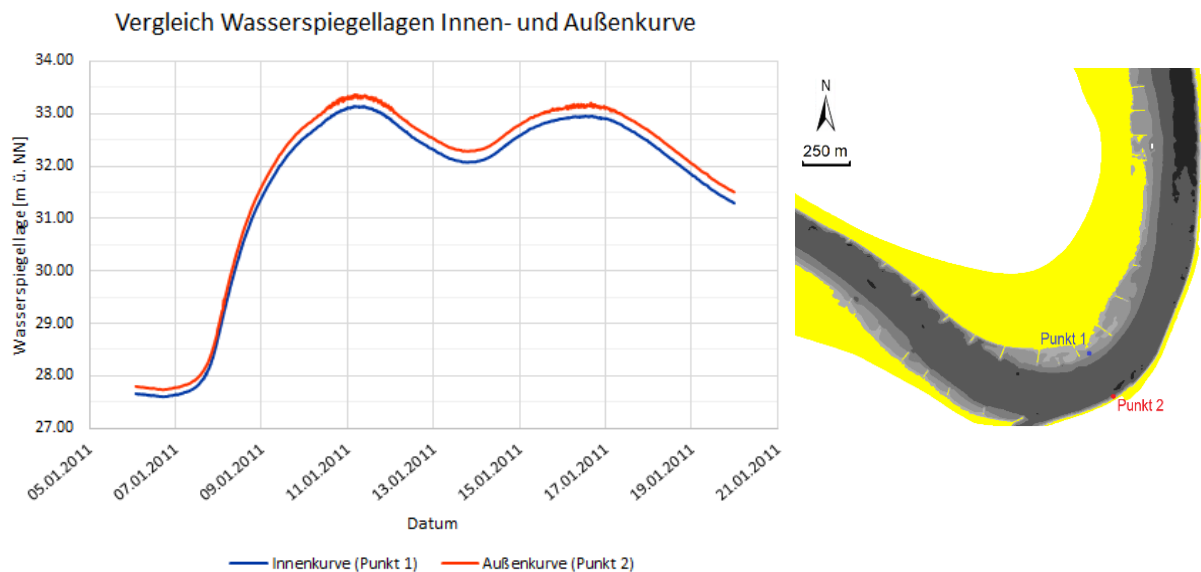


Abbildung 26: Vergleich der Wasserspiegellagen in der Innen- und Außenkurve des zweiten Mäanders

7.2 Fließgeschwindigkeiten

Im Folgenden werden die modellierten Geschwindigkeitsverteilungen getrennt nach Haupt- und Sekundärströmung betrachtet.

7.2.1 Hauptströmung

Die mit Bmor3D simulierte Verteilung der Fließgeschwindigkeiten kann zur Validierung mit den ADCP-Messungen des Ingenieurbüros Schmid verglichen werden. Dazu stehen Messungen an 8 Querschnitten zur Verfügung, wovon zwei Querschnitte kurz vor bzw. hinter Zu- und Ausstromrand hier keine Verwendung finden, da sich diese nicht mehr im Modellgebiet befinden. Exemplarisch ist in Abbildung 27 oben die Isotachendarstellung der durch Bmor3D simulierten Geschwindigkeiten im Querschnitt an Rhein-km 740,7 bei $Q=4265 \text{ m}^3/\text{s}$ abgebildet. Im Vergleich dazu sind die ADCP-Messungen der Quergeschwindigkeiten am selben Querschnitt bei $Q=4260 \text{ m}^3/\text{s}$ in Abbildung 27 unten dargestellt (Niesler, 2010). Der betrachtete Rhein-km befindet sich am Scheitel des ersten Mäanders und ist aufgrund dieser Lage besonders wichtig hinsichtlich der Simulation der speziellen Charakteristik von Geschwindigkeiten in Flusskurven. Insgesamt konnten die Messungen gut wiedergegeben werden. In der Simulation wird in der Mitte der Hauptströmung ein Maximum von $2,5 \text{ m/s}$ erreicht, welches in den Messungen dagegen bei $2,6 \text{ m/s}$ liegt. Auch die Schwankungen der Isotachen entlang des Querschnittes weisen große Übereinstimmungen auf, wobei diese bei den Messungen noch stärker ausgeprägt sind. Jedoch muss hier berücksichtigt werden, dass es sich bei der Geschwindigkeitsverteilung des Ingenieurbüros Schmid nicht wie bei der Simulation um eine Momentaufnahme handelt, sondern um Messungen die ca. eine Stunde dauerten und gemittelt wurden (Niesler, 2010). Auch die Verlagerung der schnelleren Hauptströmung hin zur Außenkurve, ebenso wie die schwankenden langsameren Geschwindigkeiten in der Innenkurve konnten gut abgebildet werden. Der Bereich der Hauptströmung bei den Messungen ist jedoch etwas kleiner, hat dafür allerdings höhere Geschwindigkeiten, während in der Simulation dieser Bereich vor allem in Richtung der Sohle weiter ausgebreitet ist. Das führt zum Einen dazu, dass die Fließgeschwindigkeiten hier ein wenig niedriger sind und des Weiteren ein deutlich steilerer Gradient hin zur nicht bewegten Sohle festzustellen ist. All diese Beobachtungen werden beim Vergleich der übrigen fünf Querschnitte (s.

Anhang A - E) bestätigt. Vor allem die Verlagerung des Hauptströmungsbereiches hin zur Gewässersohle ist dort ebenso zu verzeichnen und zum Teil noch stärker ausgeprägt. Die Größenordnung der Geschwindigkeiten und insbesondere die Verteilung der niedrigeren Geschwindigkeiten in den Uferbereichen stimmen überein. Insgesamt konnten sowohl die absoluten Fließgeschwindigkeiten als auch deren Verteilung über den Querschnitt mit hoher Übereinstimmung zu den Messungen modelliert werden.

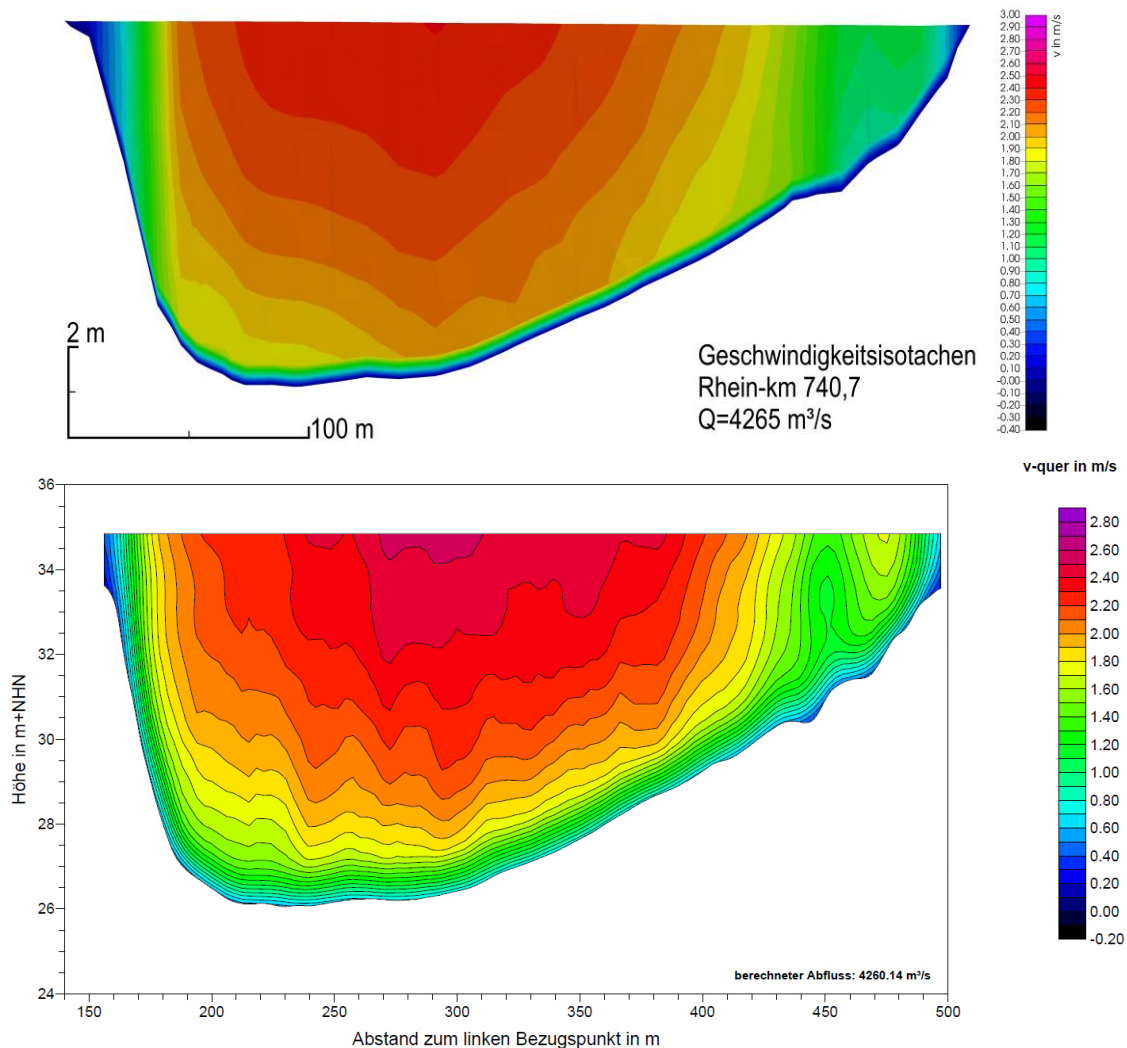


Abbildung 27: Geschwindigkeitsisotachen an Rhein-km 740,7. Oben: Simulation durch Bmor3D, Unten: ADCP-Messungen (Niesler, 2010, S. 15)

Im Vergleich mit der Simulation durch Telemac ergeben sich ebenso hohe Übereinstimmungen in Bezug auf Verteilung und absolute Werte. Darstellungen des Querschnittes an Rhein-km 740,7 mit einem vergleichbaren Durchfluss von $3080 \text{ m}^3/\text{s}$ bei Telemac und $3089 \text{ m}^3/\text{s}$ bei Bmor3D sind im Anhang F zu finden. Beide Simulationen erreichen eine maximale Geschwindigkeit von $2,3 - 2,4 \text{ m/s}$. Hier ist jedoch festzustellen, dass die Geschwindigkeitsverteilung in Telemac mit weniger Schwankungen der Isotachen verläuft als mit Bmor3D. Auch stellt Telemac den Gradient der Geschwindigkeit von der Sohle hin zur Hauptströmung weniger steil und somit naturgetreuer dar, wodurch auch der Bereich der Hauptströmung eher in der Größenordnung der Messungen liegt. Letztlich liefern beide Modelle jedoch ähnliche Ergebnisse.

7.2.2 Sekundärströmung

Da bei der Betrachtung dieser speziellen Kurvenbereiche die Bildung von Sekundärströmungen eine besonders wichtige Rolle spielt, hat das Ingenieurbüro Schmid im Zuge ihrer ADCP-Messungen in den Mäandern eine Trennung der Quergeschwindigkeiten (s. Abbildung 27 unten) von den Geschwindigkeiten der Sekundärströmung (s. Abbildung 15) vorgenommen. Dabei wurden maximale Längsgeschwindigkeiten in der Hauptströmung von bis zu 0,25 m/s, in den Ufer- und Sohlbereichen von bis zu 0,4 m/s erfasst. Im Mittel lagen die Sekundärströmungen bei einer Fließgeschwindigkeit von ca. 0,1 m/s, mit einer sichtbaren Tendenz zu Wirbelbildung. Diese Sekundärströmungen konnten bei der Simulation mit Bmor3D in diesem Maße nicht dargestellt werden.

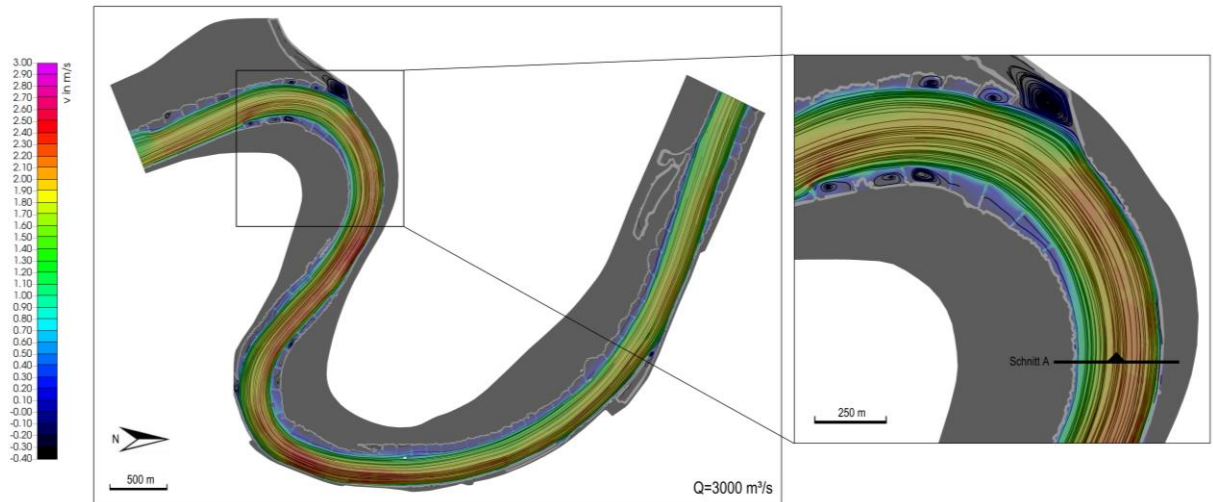


Abbildung 28: Stromliniendarstellung über Modellgebiet bei $Q=3000 \text{ m}^3/\text{s}$

In Abbildung 28 ist eine Stromliniendarstellung der Strömung über das Modellgebiet zu sehen, welche in der Lage wäre, mögliche Sekundärströmungen darzustellen. Im vergrößerten Gebiet ist zu erkennen, dass Wirbel in Strömungsrichtung entstehen, vor allem in den Bereichen zwischen den Buhnen und im Nebenarm, der Richtung Neuss führt. Jedoch treten keine sichtbaren Spiralströmungen im Kurvenbereich auf, die letztlich für die typische Erosion in den Außenkurven verantwortlich wären. Die Stromlinien verlaufen im Hauptströmungsbereich dagegen fast laminar.

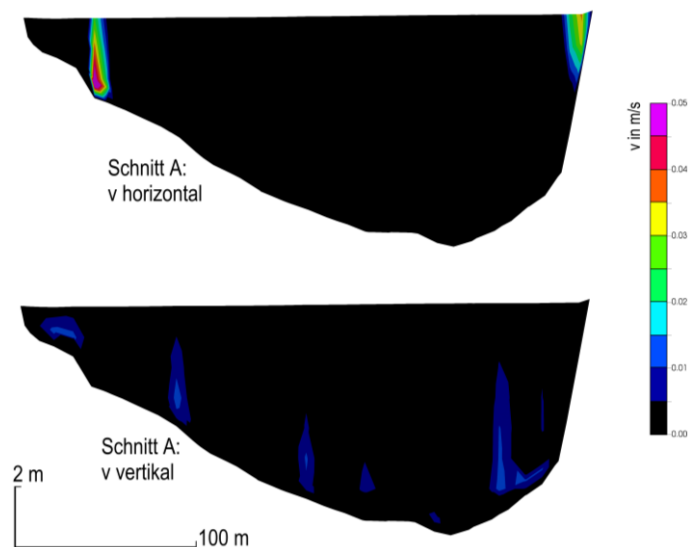


Abbildung 29: Schnitt A: Vertikal und Horizontalgeschwindigkeiten bei $Q=3000 \text{ m}^3/\text{s}$

In Abbildung 29 sind für einen genaueren Einblick die vertikalen und horizontalen Geschwindigkeiten in Schnitt A (s. Abbildung 28) farblich visualisiert. Wie dort zu erkennen ist, werden in der Simulation mit Bmor3D hier nur Sekundärgeschwindigkeiten bis maximal 0,05 m/s mit einem Mittel von ca. 0,02 m/s erreicht. Damit liegt das Maximum hier gerade einmal bei 50 % der gemessenen, gemittelten Sekundärströmungsgeschwindigkeiten. Zudem treten diese nur in den Ufer- und Sohlbereichen auf. Mittig im Querschnitt, wo die Hauptströmung auftritt, sind dagegen keinerlei oder keine in dieser Skala sichtbaren Sekundärgeschwindigkeiten zu erkennen. Die erwartete Sekundärströmung konnte mit Bmor3D also nicht ausreichend simuliert werden.

7.3 Verteilung der Sohlschubspannung

Die simulierten Sohlschubspannungen werden bei einem stationären Durchfluss von 3000 m³/s verglichen. Diese sind in Abbildung 30 sowohl von Bmor3D als auch von Telemac aufgeführt. Durch Bmor3D wird im Bereich hinter dem ersten Mäander ein Maximum von 29,0 N/m² erreicht. Diese Maxima werden analog zu den Maxima der Fließgeschwindigkeiten in den Bereichen hinter den Mäanderscheiteln erreicht. Sonst liegen die maximalen Werte wie bei Telemac bei ca. 20 N/m², jedoch sind diese eher punktuell zu verzeichnen, wohingegen die Simulation durch Telemac größere Flächen mit hohen Schubspannungen aufweist. Auch im Weiteren liefern die absoluten Werte der Sohlschubspannungen beider Modelle hohe Übereinstimmungen. Im Bereich der eingetieften Außenkurven werden Schubspannungen um 14 N/m² erreicht, im restlichen Gewässerbett in etwa 10 N/m². Auch hier ist festzustellen, dass bei Telemac größere Flächen höhere Werte aufweisen. Der Gradient hin zum nicht überströmten Ufer sowie die niedrigeren Schubspannungen um die Buhnen gestaltet sich bei beiden Simulationen ähnlich. Zudem ist festzustellen, dass bei einer weiteren Simulation durch Bmor3D bei einem bordvollen Abfluss von 4270 m³/s (s. Anhang G) tendenziell niedrigere Sohlschubspannungen auftreten als bei dem in Abbildung 30 dargestellten bettbildenden Abfluss. Das Maximum liegt hier zwar bei 32,8 N/m² und ist somit höher als bei Q=3000 m³/s, jedoch treten insgesamt niedrigere Schubspannungen auf. Bei einem Anstieg der Durchflüsse bis zu Q=7932 m³/s, wie es bei dem simulierten Hochwasserereignis der Fall ist, steigt allerdings auch die Sohlschubspannung wieder deutlich an (s. Anhang H). Hier wird ein Maximum von 64,9 N/m² erreicht. In den Kurvenbereichen mit den höchsten Fließgeschwindigkeiten liegen die Werte bei ~25 N/m². Auch ist im zweiten Mäander deutlich erkennbar, dass sich die Maxima der Schubspannungen aufgrund der hohen Durchflüsse und der vorherigen Flusskurve in der Innenkurve befinden. Erst hinter dem Scheitel verlagern sich diese Maxima von innen nach außen. Des Weiteren werden hier auch die Buhnen insbesondere an der Innenseite vor der zweiten Kurve deutlich stärker durch Schubspannungen belastet. Verglichen werden können diese anhand der Fließgeschwindigkeit und des Newton-Taylor-Beiwertes berechneten Schubspannungen mit der Schubspannung für den Bewegungsbeginn, welche sich anhand der kritischen Schubspannungsgeschwindigkeit (s. Morphodynamik in *morcoeff.dat*) ergibt, die später in der morphodynamischen Simulation Anwendung findet (Malcherek, 2001):

$$\tau = \rho \cdot v_{crit}^{*2} = 17,8 \text{ N/m}^2$$

Demnach wären bei einem derartigen Hochwasserereignis wie im Januar 2011 große Teile der Fahrrinne (gelbe Bereiche) von Erosion betroffen. Dagegen würde sowohl im bettbildenden als auch im bordvollen Abfluss nur in den wenigen roten und orangen Bereichen Erosion stattfinden. In einer realistischeren Abbildung wären noch größere Bereiche betroffen. Jedoch stimmen die Modelle von Telemac und Bmor3D hinsichtlich der absoluten Werte der Sohlschubspannung überein, die Verteilung dagegen weist Unterschiede auf.

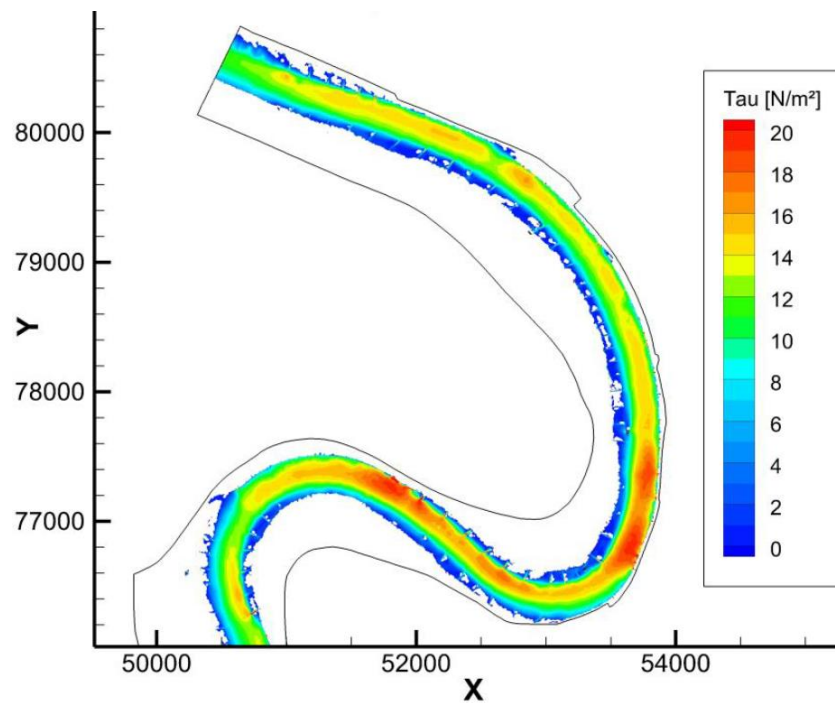
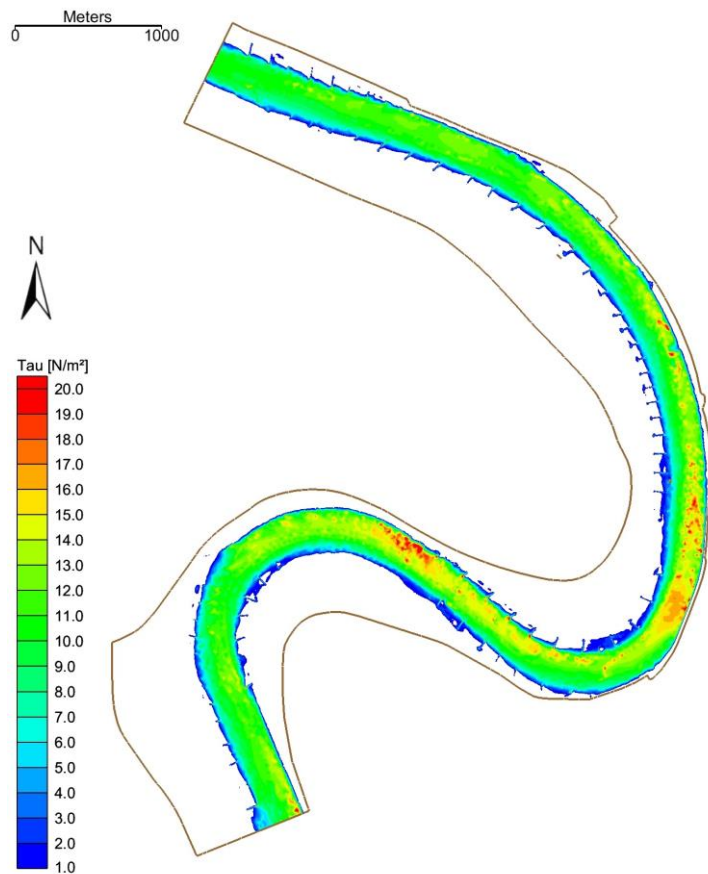


Abbildung 30: Sohlschubspannungen bei stationärem Abfluss $Q=3000 \text{ m}^3/\text{s}$. Oben: Bmor3D, Unten: Telemac-3D (BAW, 2015, S. 49)

7.4 Sohlveränderung

Die zu vergleichenden Sohlveränderungen wurden bei einem stationären Abfluss von $Q=4270 \text{ m}^3/\text{s}$ über 100 Tage modelliert. Eine weitere analoge Simulation bei $Q=3000 \text{ m}^3/\text{s}$ ist in Anhang I zu finden. Dort sind jedoch aufgrund des niedrigeren Durchflusses bedeutend weniger Änderungen in der Sohle erkennbar. Auffällig bei der in Abbildung 31 aufgeführten Sohllagenentwicklung ist die starke Erosion von maximal $-2,7 \text{ m}$ hinter der ersten Mäanderschleife, ebenso wie die sich direkt dahinter befindliche Akkumulation mit einem Maximum von $3,8 \text{ m}$. Diese Akkumulation verläuft zuerst entlang des Ufers und ragt letztlich bis mittig in den Flussschlauch hinein, womit sie sich vom übrigen Anlandungsverhalten der Simulation unterscheidet. Anlandungen sind vor allem stark in und hinter dem zweiten Mäander am Außenufer zu finden, ebenso wie in den drei Seitenarmen mit bis zu 4 m : Linksrheinisch vor dem ersten Mäander nach Neuss sowie rechtsrheinisch hinter der zweiten Flusskurve zu zwei Anlegestellen. Zudem sind zwischen den Buhnen Tendenzen zur Akkumulation zu erkennen, jedoch in geringerem Rahmen mit $0,2 - 0,4 \text{ m}$. Ein deutlicher Unterschied zur Simulation von Telemac (s. Abbildung 31) bei denselben Bedingungen ist, dass nicht über den gesamten Flussschlauch Sohländerungen auftreten. Bei Telemac treten Veränderungen über die gesamte Länge des betrachteten Flussschlauches auf. Diese sind Richtung Ufer geringer und mittig, dort wo höhere Fließgeschwindigkeiten und Sohlschubspannungen auftreten, entsprechend höher. Bei Bmor3D treten über weite Teile des Modellgebietes gar keine Veränderungen auf, dafür im Bereich des zweiten Mäanders sehr starke. Dort ist ein Wechsel von Akkumulation und Erosion mit Schwankungen von $\pm 1,5 \text{ m}$ zu beobachten. Vor und in der ersten Flusskurve sowie über die letzte, weitestgehend geradlinig verlaufende Rheinstrecke finden bei der Modellierung mittels Bmor3D, außer der Anlandung zwischen den Buhnen, fast keine Sohländerungen statt. Im Vergleich zu den simulierten Sohlschubspannungen bei $Q=4270 \text{ m}^3/\text{s}$ (s. Anhang G) sind nur teilweise die erwarteten Zusammenhänge zu finden. Zwar findet an den wenigen Stellen der überschrittenen Sohlschubspannung für den Bewegungsbeginn ($17,8 \text{ N/m}^2$) Erosion statt, tatsächlich tritt diese jedoch ab einer Schubspannung von ca. 15 N/m^2 deutlich großflächiger auf. Die starken Erosionen hinter den Flusskurven resultieren aus den lokal erhöhten Sohlschubspannungen (s. Abbildung 30). Auch zu erkennen ist, dass bei einem niedrigeren Abfluss von $Q=3000 \text{ m}^3/\text{s}$ zwar höhere Schubspannungen entstehen, jedoch deutlich geringere und weniger ausgebreitete Erosionen simuliert wurden (s. Anhang I). Die hohen Anlandungen in der Außenkurve des zweiten Mäanders sowie in den Seitenarmen sind im bettbildenden Abfluss ebenso zu finden, wenn auch geringer ausgeprägt. Auch die Anlandungen zwischen den Buhnen und die starke Erosion, gefolgt von einer Akkumulation hinter der ersten Mäanderschleife, ist bei $Q=3000 \text{ m}^3/\text{s}$ ähnlich wenn auch geringer. Im Vergleich zu den tatsächlich gemessenen Sohlhöhenentwicklungen über zwei Jahre (s. Abbildung 17) sind zwar einige Erosionsfelder ähnlich angesiedelt wie in der Natur, jedoch überwiegen die Unterschiede deutlich. Die Veränderungen finden auch hier über den gesamten Flussabschnitt statt und können in getrennte Felder unterteilt werden, in denen entweder Erosion oder Akkumulation stattfindet. Auch die Anlandungstendenz zwischen den Buhnen ist in den Naturmessungen nicht zu beobachten. Vor allem ist trotz der unterschiedlichen Simulationsdauer von 100 Tagen im Vergleich zu zwei Jahren zu erkennen, dass die Größenordnung der Veränderung in der morphodynamischen Simulation mit Bmor3D bei weitem zu hoch ausfällt. Die Sohlhöhenänderungen in den Naturmessungen befinden sich etwa in einem Bereich von $\pm 0,2 \text{ m}$. Demnach war eine realistische Modellierung der Sohllagenveränderung sowohl in der Verteilung, wie auch in der Größenordnung, mittels Bmor3D nicht möglich.

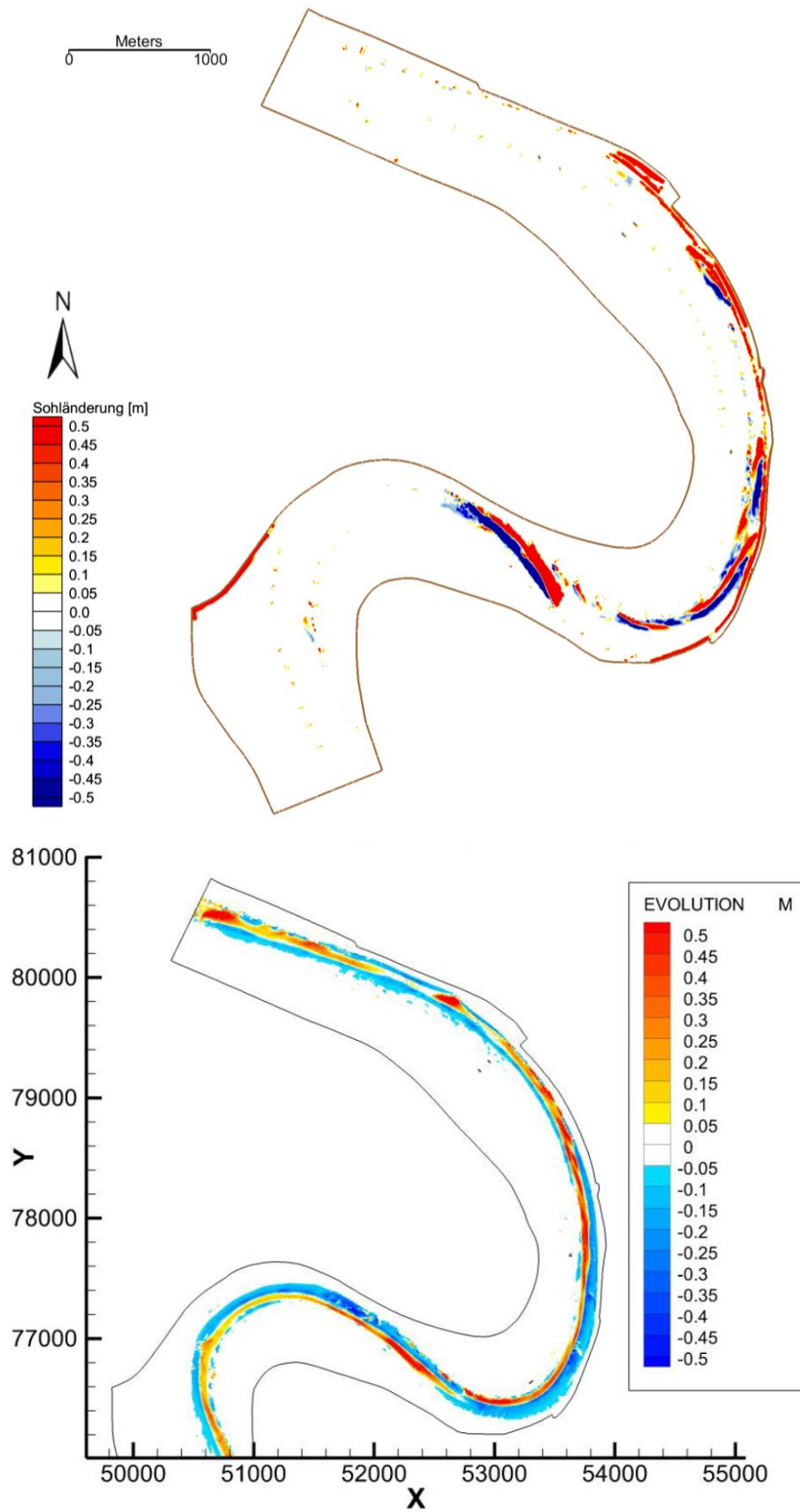


Abbildung 31: Sohlagenänderung nach 100 Tagen bei stationärem Abfluss $Q=4720 \text{ m}^3/\text{s}$.
Oben: Bmor3D, Unten: Telemac-3D (BAW, 2015, S. 52)

8 Bewertung

Ziel dieser Arbeit war es, mithilfe des Strömungsmodells Bmor3D die Fließgeschwindigkeiten innerhalb der Mäanderkurven des Rheins bei Düsseldorf mit Augenmerk auf die Sohlschubspannungen zu simulieren. Zudem wurde versucht, in kleinerem Rahmen die Sohllagenänderung mithilfe eines morphodynamischen Modells zu berechnen. Anhand der durch die BAW zur Verfügung gestellten hydraulischen und morphologischen Messdaten sowie der Simulation mittels Telemac-Sisyphe lagen hervorragende Vergleichsmöglichkeiten für die Simulationen mit Bmor3D vor.

Wie durch die BAW vorgeschlagen, wurde für die Simulation ein Hochwasserereignis von Januar 2011 gewählt. Bmor3D lieferte für die gewählten zwei Wochen trotz Extremwerten bei Durchfluss, Geschwindigkeit und Wasserstand gute Ergebnisse. Es konnte ein Quergefälle des Wasserspiegels in den Kurvenbereichen simuliert werden, welches einer Einordnung in realistische Werte standhält. Das Gefälle in Gewässerlängsrichtung dagegen entsprach nicht den erwarteten Werten der Messungen. Da das berechnete Gefälle zu hoch liegt, hätte der k_s -Wert bei der Kalibrierung niedriger gewählt werden müssen.

Die Simulation der Fließgeschwindigkeiten in Bezug auf die Hauptströmung ergab sowohl im Vergleich mit den ADCP-Messungen als auch mit der Simulation durch Telemac-Sisyphe sehr hohe Übereinstimmungen in Bezug auf Verteilung und Werte der Geschwindigkeiten. Abweichungen zu beiden traten auf, da bei Bmor3D der Hauptströmungsbereich größer ausfällt und der Gradient zur unbewegten Sohle sehr steil verläuft. Die Sekundärströmungen in den Mäandern konnten nicht oder nur unzureichend abgebildet werden. Es waren deutlich zu niedrige Fließgeschwindigkeiten auf den Querschnittsebenen festzustellen und deren Verteilung entsprach nicht den Erwartungen. Eine Verbesserung könnte durch ein Anpassen der Impulsaustauschkoeffizienten zwischen den Schichten in Bmor3D erreicht werden. Weiterhin müsste das Modell auf die Abwesenheit von Transportkörpern in diesem Rheinabschnitt angepasst werden.

Die Verteilung der Sohlschubspannung erbrachte im Vergleich zu den Ergebnissen von Telemac-Sisyphe hohe Ähnlichkeiten. Die Wertebereiche und die grobe Verteilung decken sich, jedoch waren die Bereiche der höheren Schubspannungen in Bmor3D weniger stark ausgeprägt. Eine stärkere Ausprägung bzw. ein generelles Erhöhen der Sohlschubspannungen hätte ebenso durch ein Vergrößern des k_s -Wertes erzielt werden können. Da jedoch keine vergleichbaren Messwerte vorliegen, kann nur vermutet werden, dass eine naturgetreuere Abbildung tendenziell höhere Werte aufweisen würde.

Bei der Simulation der Sohllagenänderung konnten sowohl im Vergleich zu Telemac-Sisyphe wie auch zu den Naturmessungen kaum Übereinstimmungen erzielt werden. Die fehlende Veränderung in großen Bereichen des Gebietes, hervorgerufen durch einen Transportbeginn erst ab einer kritischen Schubspannungsgeschwindigkeit, die vielerorts nicht erreicht wurde, führte zu starken Unterschieden in der Verteilung. Diese Schubspannung basiert jedoch auf einem berechneten mittleren Korndurchmesser, welcher anhand der durch die BAW erfassten Korngrößenverteilung festgelegt wurde und somit das Modellgebiet repräsentieren sollte. Bei einer niedrigeren Wahl der kritischen Schubspannungsgeschwindigkeit wäre zwar großflächiger und somit naturgetreuer erodiert worden, jedoch wären die ohnehin schon erhöhten Umlagerungen womöglich noch höher ausgefallen.

9 Fazit

Die Simulation einer Geschwindigkeitsverteilung ist mit Bmor3D sehr gut möglich. Für eine realistische Darstellung von Sekundärströmungen war das Modell in diesem Fall dagegen nur eingeschränkt nutzbar. Hier muss eine umfangreiche Kalibrierungs- und Testphase vorausgehen, um alle Parameter bestmöglich abzustimmen. Dies ist jedoch in einer Größenordnung notwendig, die den Rahmen dieser Arbeit übersteigt. Zudem ist ein Vergleich problematisch, da durch Messungen eine exakte Abbildung der Realität kaum machbar ist. Widersprüchlich ist ebenso, dass die Verteilung der Hauptströmung gut abgebildet werden konnte, die offensichtlich daran stark gekoppelte Sekundärströmung dagegen nicht. Dies spricht dafür, dass theoretisch eine naturgetreuere Abbildung aller Strömungen mit Bmor3D nach Anpassung des Rauheitsbeiwertes sowie der Austauschparameter möglich sein kann.

Selbiges gilt für die Abbildung von Sohlschubspannungen, was prinzipiell möglich ist, jedoch ausgiebiger vorbereitet werden muss. Zusätzlich zu einer besseren Kalibrierung der Rauheit könnten hier, beispielsweise mit weitergehenden Informationen über die Formrauheit durch Dünen und Riffel, naturnähere Ergebnisse erzielt werden.

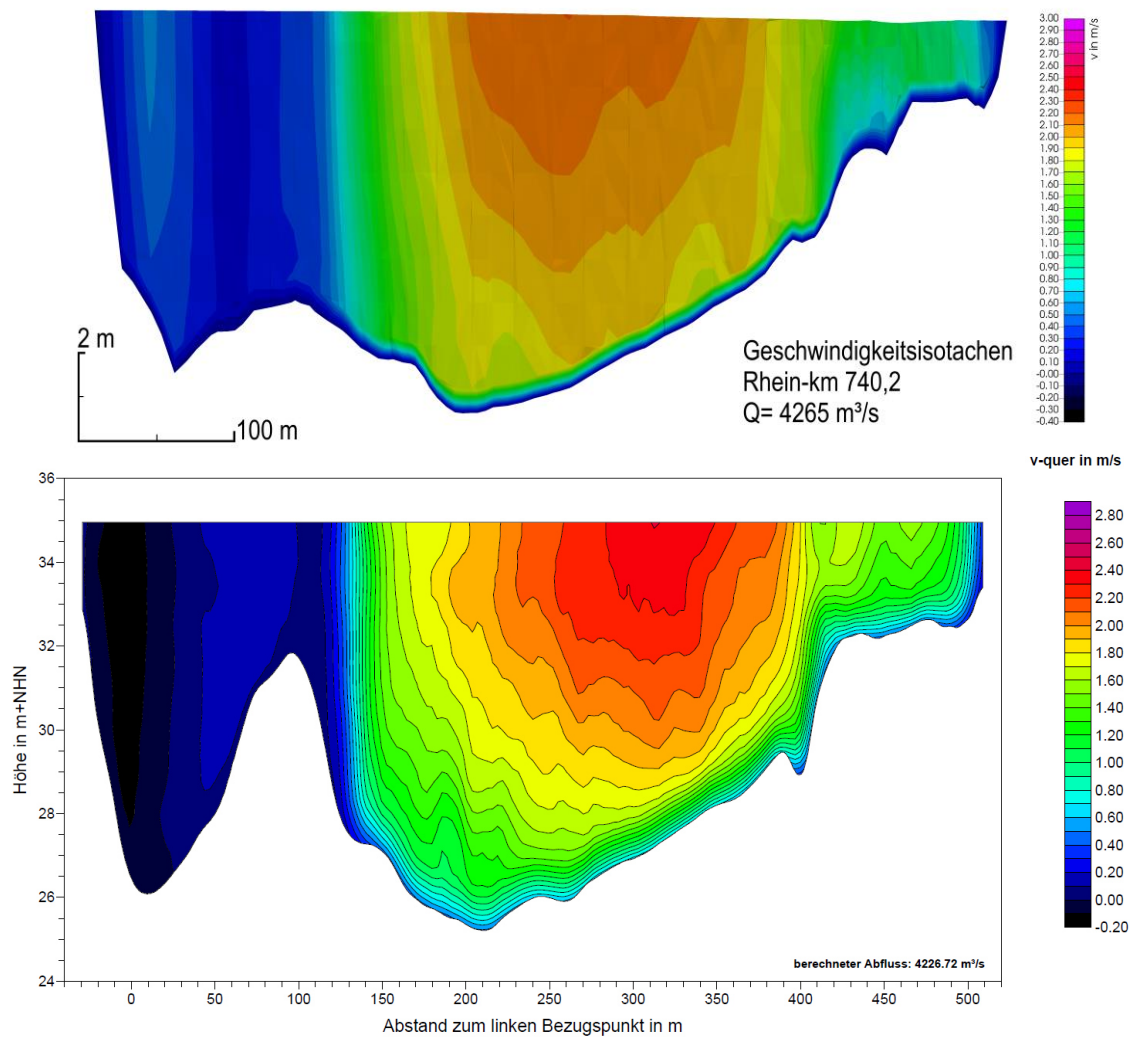
Eine realistische Simulation der Sohllagenänderung hingegen ist mit Bmor3D in dieser Form noch nicht möglich. Der verwendete Ansatz von Meyer-Peter und Müller, bei dem unterhalb einer definierten Geschwindigkeit keine Bewegung stattfindet, sorgt für große Abweichungen. Diese definierte Bewegungsgrenze hängt von der Korngröße ab, welche hier über das gesamte Gebiet gemittelt wurde. Diese Mittelung bildet das Modellgebiet nicht ausreichend ab, da sich aufgrund des mäandrierenden Flussverlaufes eine deutlich gröbere Körnung in der Außenkurve als in der Innenkurve eingestellt hat, wie bei der Beprobung der Gewässersohle durch die BAW festgestellt wurde. Mit verschiedenen Bewegungsgrenzen, je nach Körnung bzw. Flussgebiet, könnten sowohl die fehlende Veränderung aufgrund der dort zu hohen kritischen Geschwindigkeit, als auch die zu starke Veränderung aufgrund der dort zu niedrigen kritischen Geschwindigkeit verbessert werden. Zu empfehlen wäre demnach eine Mehrkornberechnung mithilfe derer Bereiche mit niedrigeren Sohlschubspannungen feinere Sedimente zugeordnet werden, wodurch auch dort Umlagerungen stattfinden würden.

Um die komplexen Strömungsverhältnisse in stark anthropogen beeinflussten Gewässern wie dem Rhein nachvollziehen zu können, ist das Modell Bmor3D letztlich gut geeignet. Für eine Prognose der Sohlveränderung und eine Orientierung beim Geschiebemanagement müssen jedoch weitere Modifikationen vorgenommen werden.

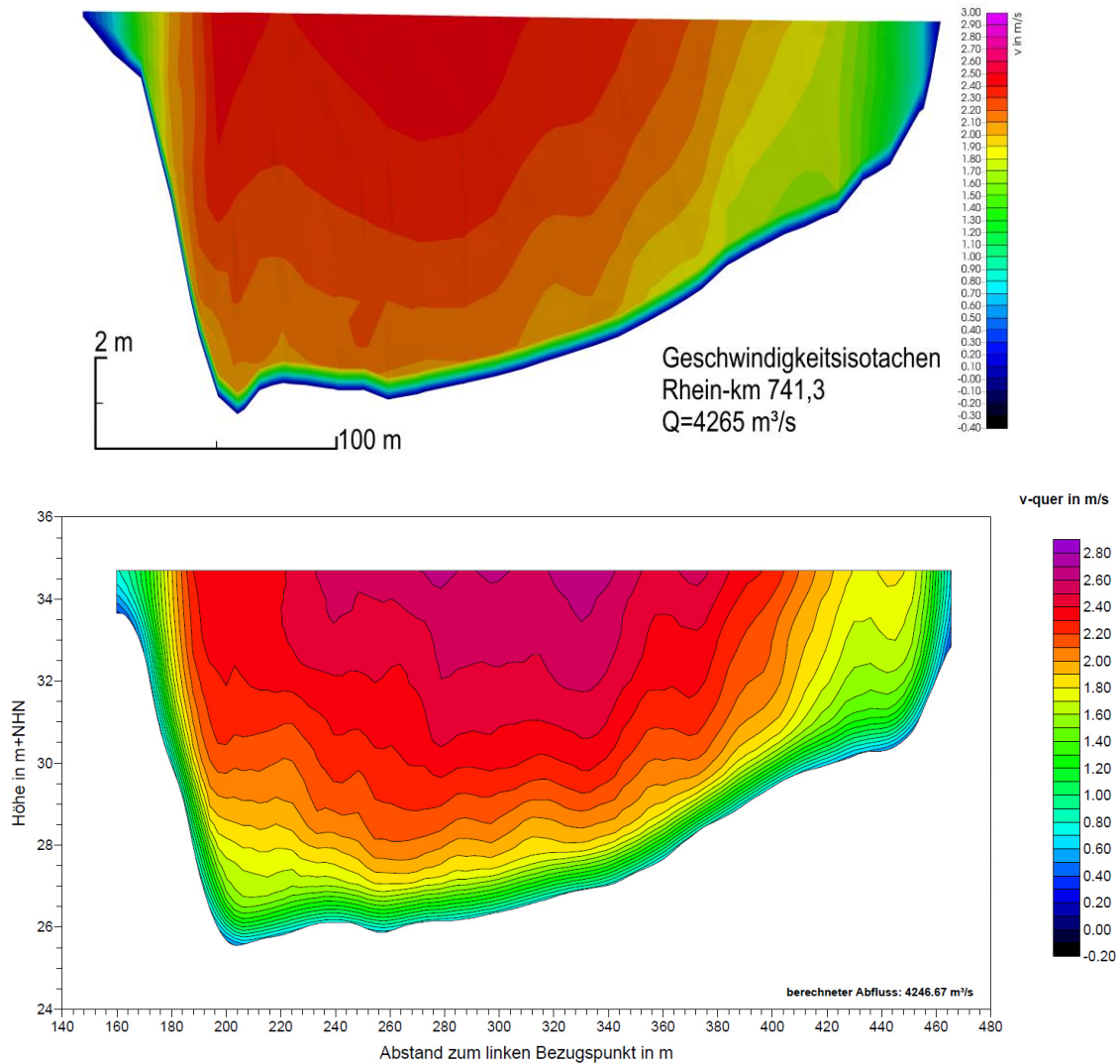
Anhang

Vergleich der Geschwindigkeitsisotachen an Rhein-km 740,2. Oben: Simulation durch Bmor3D, Unten: ADCP-Messungen (Niesler, 2010, S. 13)	A
Vergleich der Geschwindigkeitsisotachen an Rhein-km 741,3. Oben: Simulation durch Bmor3D, Unten: ADCP-Messungen (Niesler, 2010, S. 17)	B
Vergleich der Geschwindigkeitsisotachen an Rhein-km 742,1. Oben: Simulation durch Bmor3D, Unten: ADCP-Messungen (Niesler, 2010, S. 19)	C
Vergleich der Geschwindigkeitsisotachen an Rhein-km 743,0. Oben: Simulation durch Bmor3D, Unten: ADCP-Messungen (Niesler, 2010, S. 21)	D
Vergleich der Geschwindigkeitsisotachen an Rhein-km 743,7. Oben: Simulation durch Bmor3D, Unten: ADCP-Messungen (Niesler, 2010, S. 23)	E
Vergleich der Ergebnisse von Bmor3D und Telemac: Geschwindigkeitsisotachen an Rhein-km 740,7. Oben: Bmor3D, Unten: Telemac (BAW, 2015, S. 39)	F
Sohlschubspannungen durch Bmor3D bei einem stationären Durchfluss von $Q=4270 \text{ m}^3/\text{s}$	G
Sohlschubspannungen durch Bmor3D während des ersten Hochwasserscheitels bei $Q=7932 \text{ m}^3/\text{s}$	H
Sohllagenänderung nach 100 Tagen bei stationärem Durchfluss $Q=3000 \text{ m}^3/\text{s}$. Oben: Bmor3D, Unten: Telemac-3D (BAW, 2015, S. 51)	I

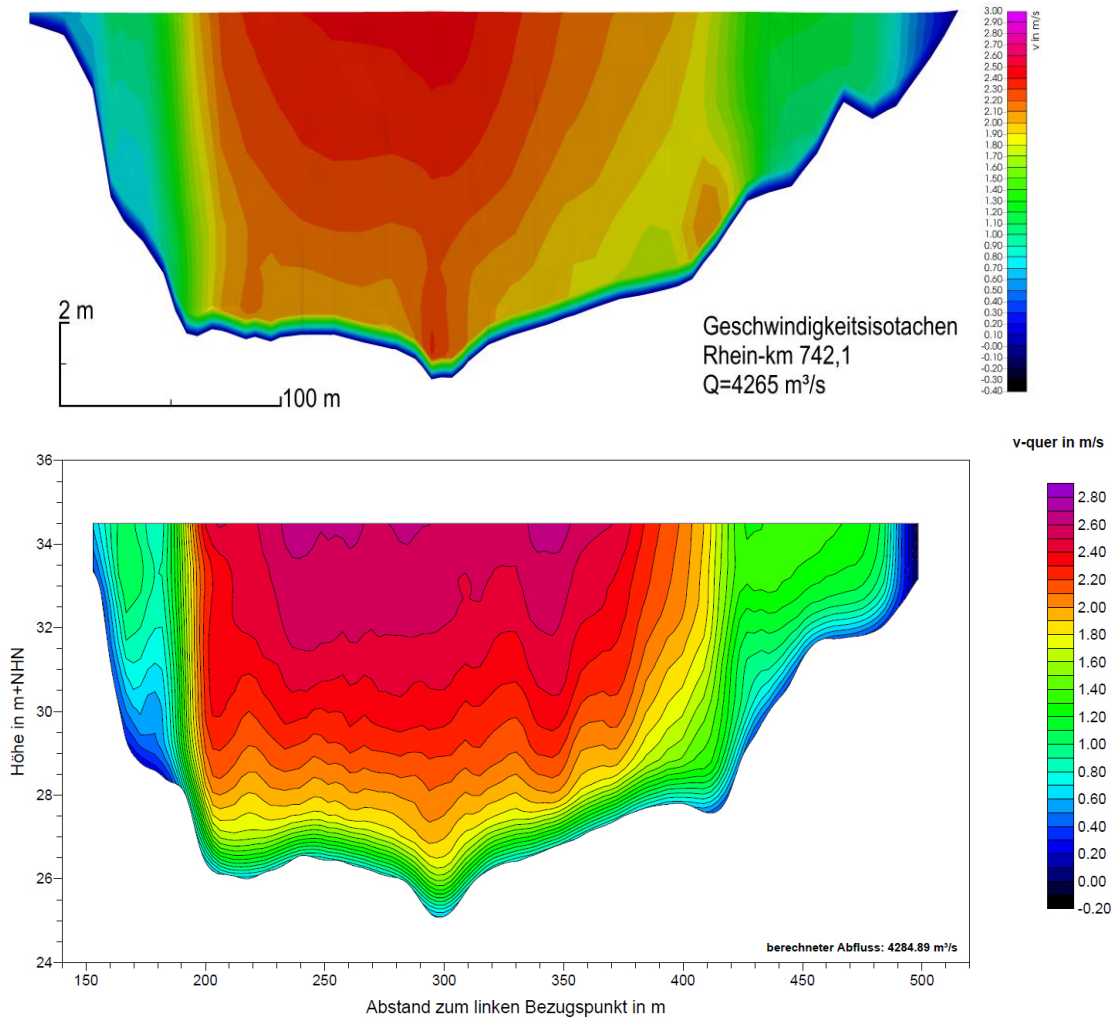
Vergleich der Geschwindigkeitsisotachen an Rhein-km 740,2. Oben: Simulation durch Bmor3D, Unten: ADCP-Messungen (Niesler, 2010, S. 13)



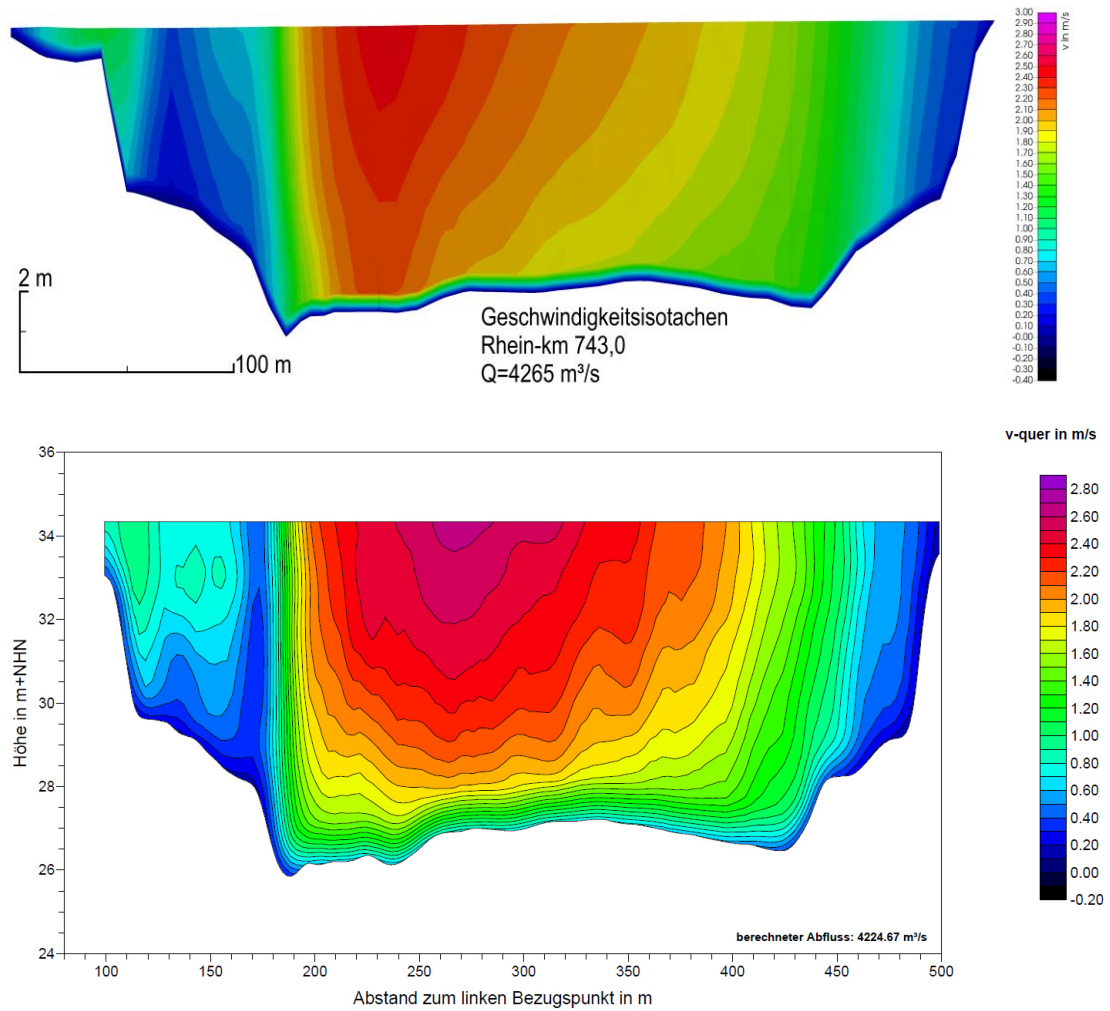
Vergleich der Geschwindigkeitsisotachen an Rhein-km 741,3. Oben: Simulation durch Bmor3D, Unten: ADCP-Messungen (Niesler, 2010, S. 17)



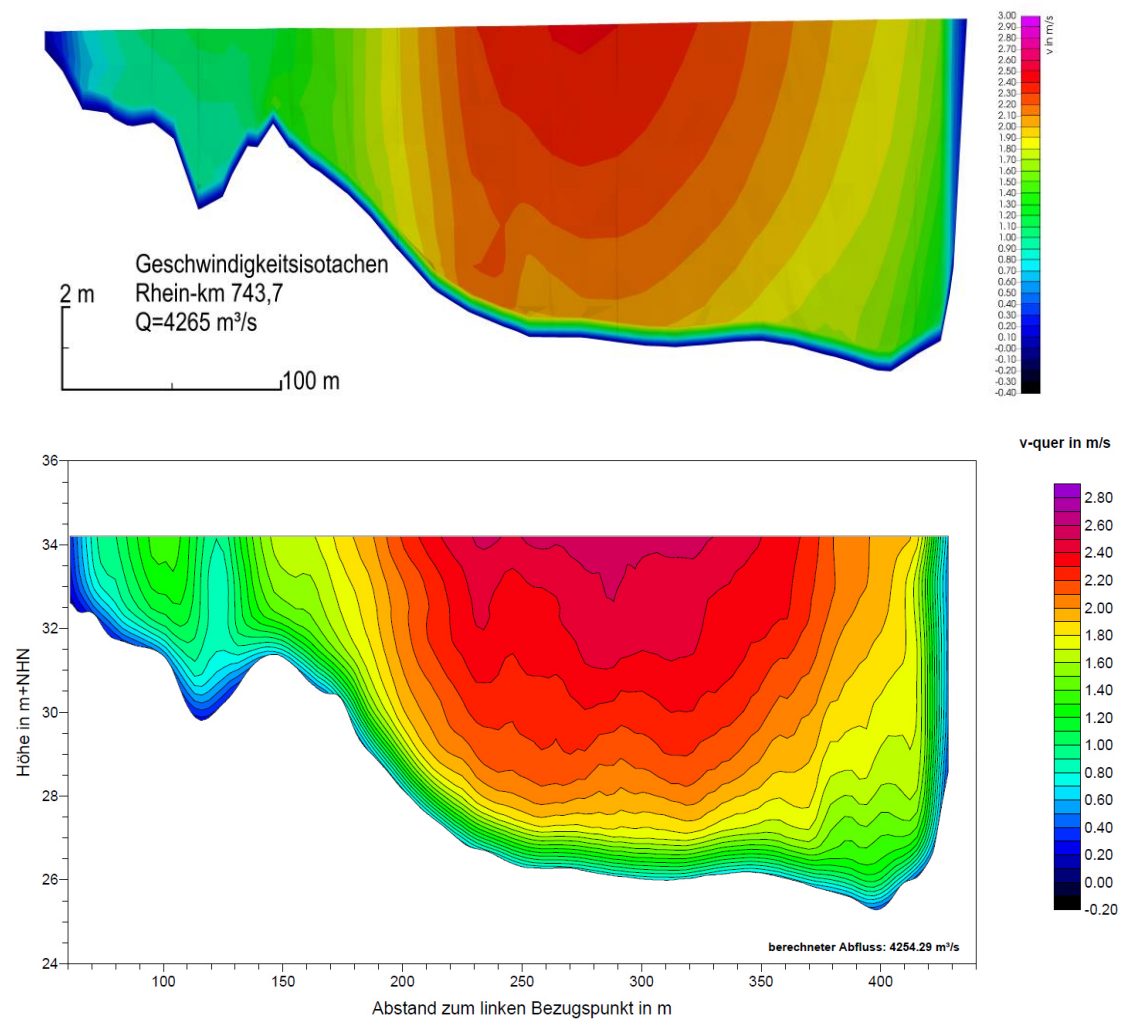
Vergleich der Geschwindigkeitsisotachen an Rhein-km 742,1. Oben: Simulation durch Bmor3D, Unten: ADCP-Messungen (Niesler, 2010, S. 19)



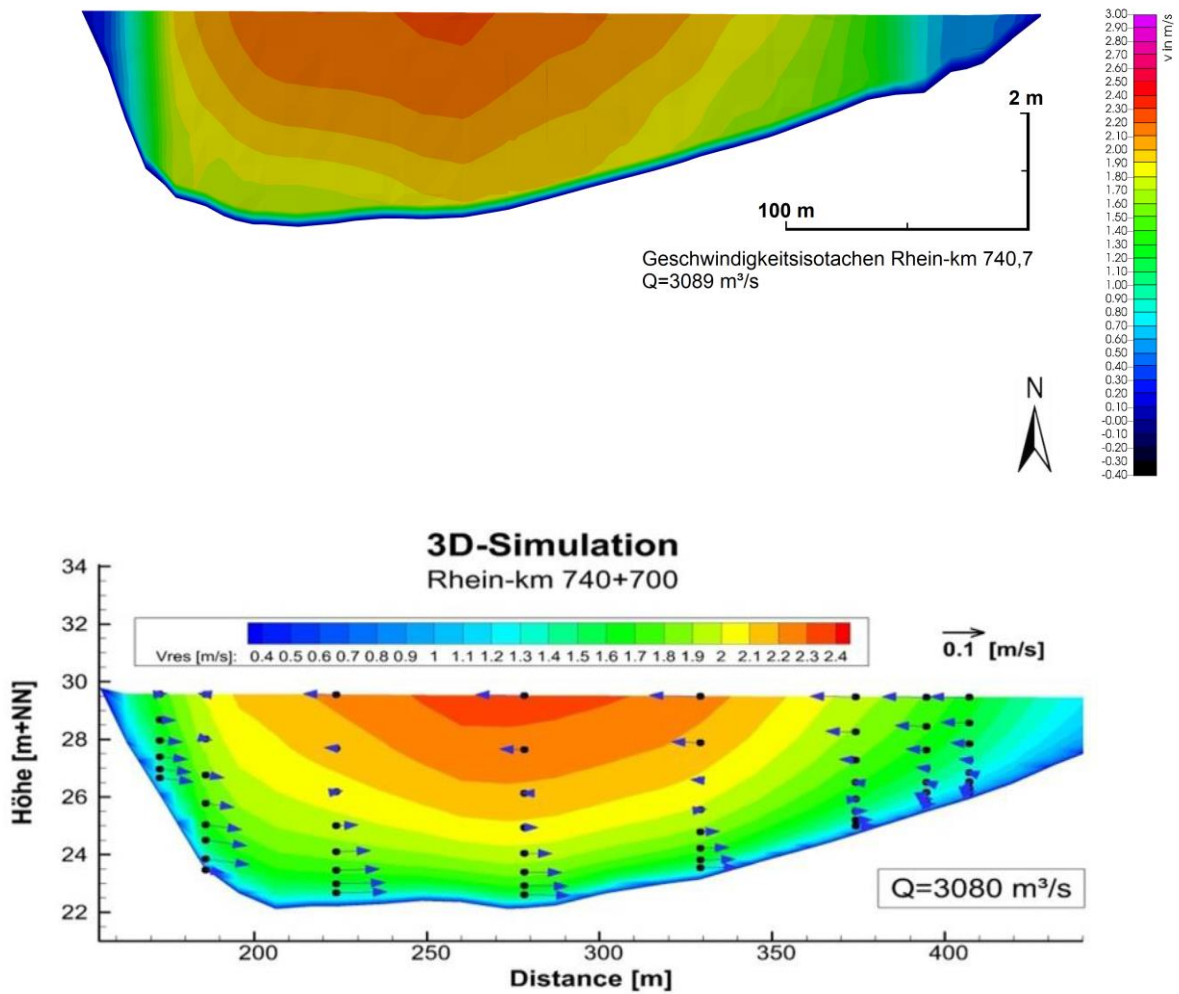
Vergleich der Geschwindigkeitsisotachen an Rhein-km 743,0. Oben: Simulation durch Bmor3D, Unten: ADCP-Messungen (Niesler, 2010, S. 21)



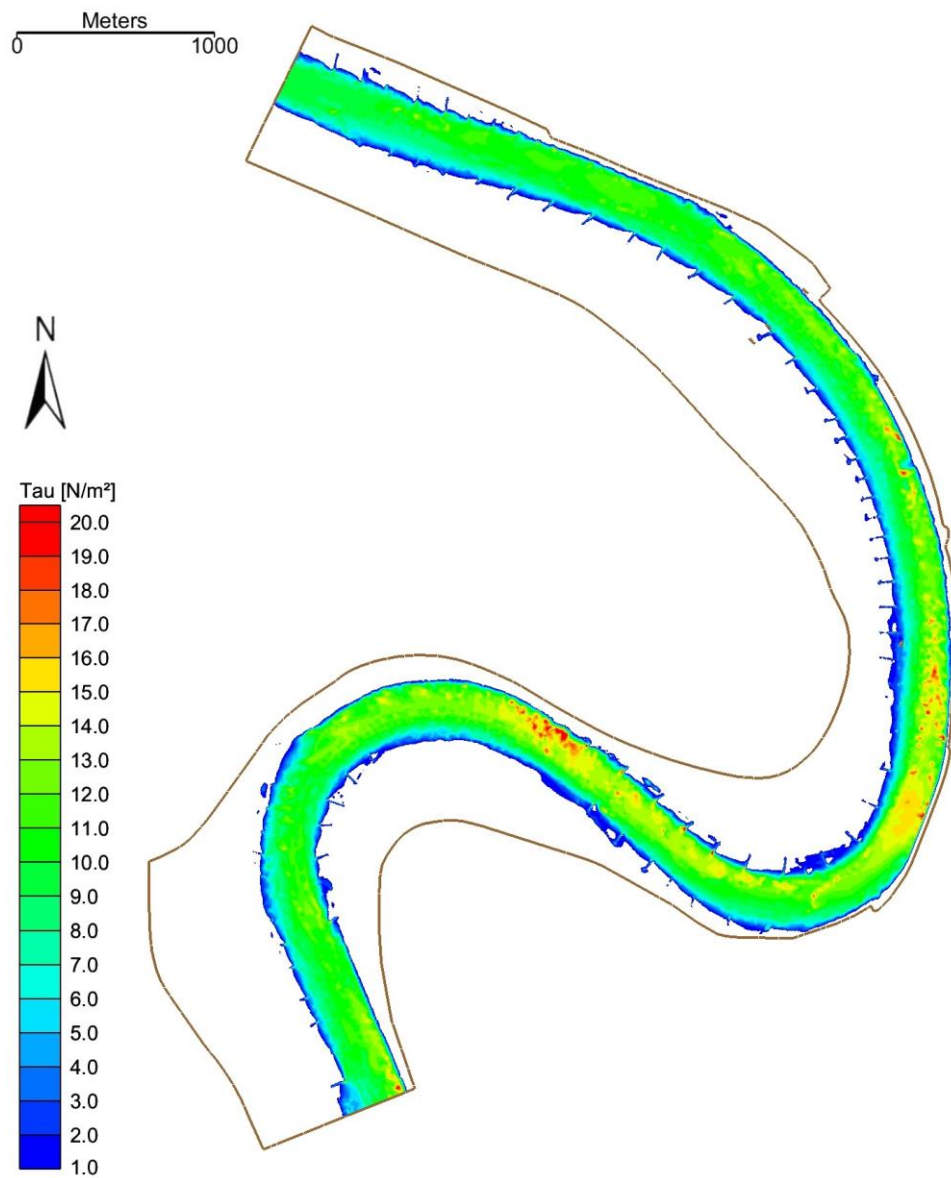
Vergleich der Geschwindigkeitsisotachen an Rhein-km 743,7. Oben: Simulation durch Bmor3D, Unten: ADCP-Messungen (Niesler, 2010, S. 23)



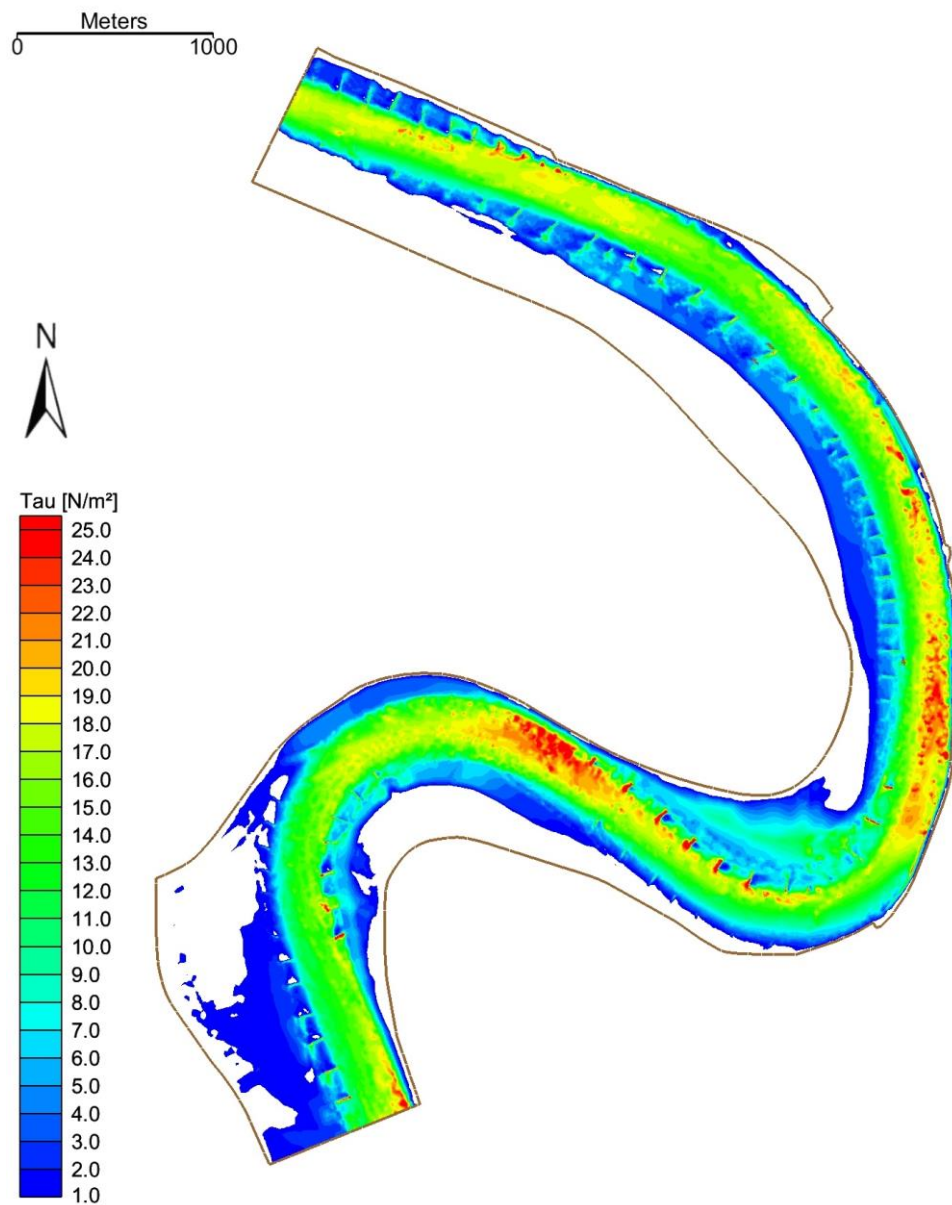
Vergleich der Ergebnisse von Bmor3D und Telemac: Geschwindigkeitsisotachen an Rhein-km 740,7. Oben: Bmor3D, Unten: Telemac (BAW, 2015, S. 39)



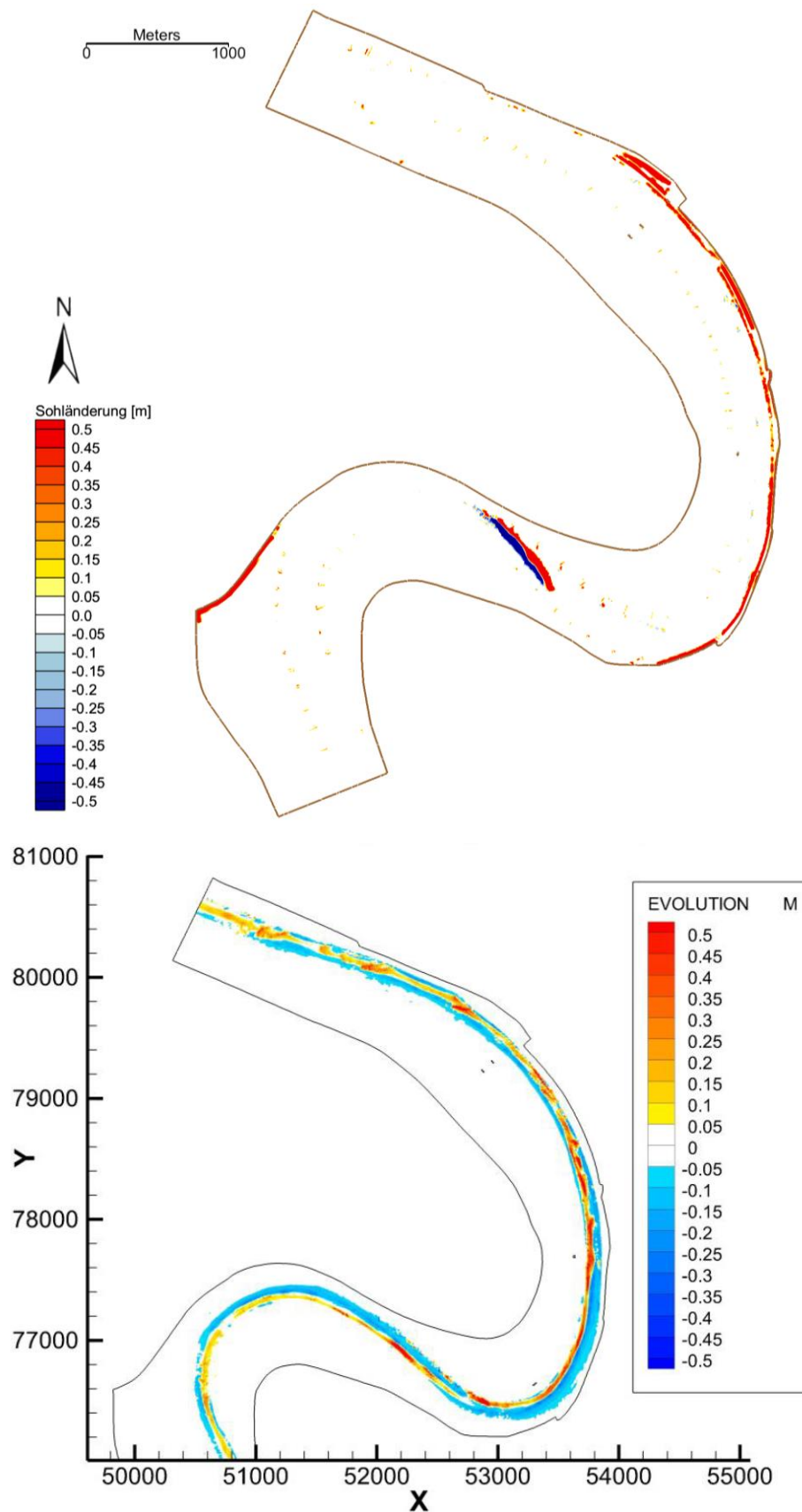
Sohlschubspannungen durch Bmor3D bei einem stationären Durchfluss von $Q=4270 \text{ m}^3/\text{s}$



Sohlschubspannungen durch Bmor3D während des ersten Hochwasserscheitels bei
 $Q=7932 \text{ m}^3/\text{s}$



Sohllagenänderung nach 100 Tagen bei stationärem Durchfluss $Q=3000 \text{ m}^3/\text{s}$. Oben: Bmor3D, Unten: Telemac-3D (BAW, 2015, S. 51)



Literaturverzeichnis

- BAW. (2015). Validierungsfall Niederrheinmäander. In Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.
- BAW. (2018). "Validierungsfall Niederrhein" Kalibrierung und Validierung des hydrodynamisch-numerischen Modells. In Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.
- Blankaert, K., & Vriend, H. J. d. (2003). Nonlinear modeling of mean flow redistribution in curved open channels. In Lausanne: Laboratoire d'Hydraulique Environnementale, Ecole Polytechnique Fédérale.
- Bollrich, G. (2013). Technische Hydromechanik : 1. Grundlagen. In *Beuth Wissen*. Berlin.
- Der aktuelle Rheinpegel in Düsseldorf - Berechnung. (03.07.2019). Retrieved from <https://www.duesseldorf.de/rheinpegel.html>
- Der Rhein unter der Einwirkung des Menschen : Ausbau, Schifffahrt, Wasserwirtschaft. (1994). In H. Kalweit (Ed.), *Bericht / Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes. 1, der KHR* (2. Aufl. ed., Vol. 11). Lelystad.
- Eichhorn, A. (2010). Skript, Einführung in die Vermessungskunde. In (5., erweiterte Auflage ed.). Darmstadt: Institut für Geodäsie, Technische Universität Darmstadt.
- Fleißner, R., & Dorfmann, C. (2013). Bed Load Analyzer - Software zur Berechnung von hydraulischen und sedimentologischen Parametern in gegliederten Querschnitten In *Referenzhandbuch Version 2.0*. Graz: TU Graz, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
- Fließgeschwindigkeits- und Durchflussmessungen. (21.05.2019). Retrieved from <http://www.schmid-ib.de/Leistungen/Durchflussmessungen/durchflussmessungen.html>
- Göbel, K., & Strange, B. (2008). Wasserstands-Abfluss-Beziehungen an hessischen Pegeln - Ein Beitrag zum vorsorgenden Hochwasserschutz -. *Jahresbericht 2008*. Retrieved from https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/das_hlug/jahresbericht/2008/Jb_2008_051-058_screen.pdf
- Herwig, H., & Schmandt, B. (2018). Strömungsmechanik : Physikalisch-mathematische Grundlagen und Anleitung zum Lösen von Aufgaben. In *Springer Lehrbuch* (4., erweiterte Auflage ed.). Berlin.
- Katzenbach, P. D.-I. R. (2013). Studienunterlagen Geotechnik. In Darmstadt: Institut für Geotechnik, Technische Universität Darmstadt.
- Lohrey, T. (2017). *Analyse des Einflusses von Flüssigschlick auf die Gezeitendynamik der Ems*. (Masterarbeit). Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- Malcherek, A. (2001). Hydromechanik der Fließgewässer. In *Bericht / Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover* (Vol. 61). Hannover.
- Mayer, G. (Februar 2006). Der Einsatz von Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) bei hydrographischen Messungen. *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 151(2).
- Mewis, P. (2002). Morphodynamisch-numerische Modellierung von Flußkurven. In *Mitteilungen* (Vol. 126). Darmstadt: Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Darmstadt.
- Mewis, P. (2012). Skript, Numerische Simulation von Strömungsvorgängen im Wasserbau. In Darmstadt: Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Darmstadt.
- Niesler, H. (2010). Bericht zu den Geschwindigkeitsmessungen auf dem Rhein; Rhein-km 738,500 bis Rhein-km 745,900; Messungen vom März 2010. In Kapsweyer: Ingenieurbüro Schmid.
- Numerische Simulationen im Wasserbau. (1997). In *Mitteilungen* (Vol. 98). Darmstadt: Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Darmstadt.

-
- Oertel, H., Böhle, M., & Reviol, T. (2015). Strömungsmechanik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. In (7., überarb. Aufl. ed.). Wiesbaden.
- Patt, H., Jürging, P., Kraus, W., Jürging, P., & Kraus, W. (2009). Naturnaher Wasserbau : Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern. In (3., bearb. und aktualisierte Aufl. ed.). Berlin, Heidelberg.
- Richards, K. (1982). Rivers : form and process in alluvial channels. In *University paperbacks* (Vol. 771). London.
- Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. (07.07.2019). *Pegelonline - Pegelauswahl über Karte*. Retrieved from <https://www.pegelonline.wsv.de/gast/karte/standard;jsessionid=E0F0EF7C987237C6CB79CD8CCCD16414>
- Wurpts, A. (2006). Numerische Simulation von Dichteeffekten am Beispiel der Umlagerung von Baggergut im Ästuarbereich. In *Mitteilungen* (Vol. 140). Darmstadt: Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Darmstadt.